

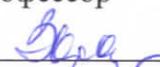
Российская академия наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МИКРОСТРУКТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 537.9
№ госрегистрации 01201170369
Инв. №

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФМ РАН,
профессор

 З.Ф. Красильник
« 06 » / 11 2012 г.



ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
**«Развитие центром коллективного пользования научным оборудованием
комплексных исследований в области формирования и исследования
многослойных наноструктур на основе Si, GaAs и GaN для пассивных и
активных элементов наноэлектроники и нанопотоники миллиметрового и
инфракрасного диапазонов длин волн»**

Шифр заявки «2011-5.2-552-001-005»
(заключительный)

Этап 4: «Обобщение и оценка результатов исследований»

(Государственный контракт №16.552.11.7007 от «29» апреля 2011 г.)

Научный руководитель,
зам. директора по НИР,
доктор физ.-мат. наук

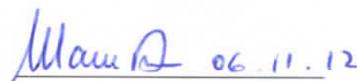
 06.11.2012
подпись, дата

В. И. Шашкин

Нижний Новгород 2012

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель,
зав. отд., д.ф.-м.н.


06.11.12
подпись и дата

В. И. Шашкин (введение,
разделы 2,4,5,6,7
заключение)

Исполнители темы
Ответственный
исполнитель,
в.н.с., д.ф.-м.н.


06.11.12
подпись и дата

Ю. Н. Дроздов (разделы
1,3,5,6)

Зав. лаб., д.ф.-м.н.


06.11.12

Н.И. Чхало (раздел 7)

Нач. отдела закупок
ИФМ РАН


06.11.12
подпись и дата

О.В. Вилкова (раздел 1)

н.с., к.ф.-м.н.


06.11.12
подпись и дата

П.В. Волков (раздел 1)

с.н.с., к.ф.-м.н.


06.11.12
подпись и дата

М.Н. Дроздов (разделы
2,3,4)

н.с., к.х.н.


06.11.12
подпись и дата

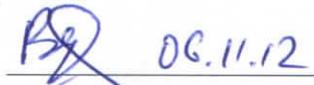
Г.Л. Пахомов (раздел 1)

с.н.с., к.ф.-м.н.


06.11.12
подпись и дата

А.Ю. Аладышкин (разделы
1,3)

с.н.с., к.ф.-м.н.


06.11.12
подпись и дата

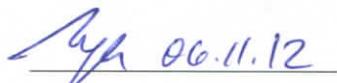
С.Н. Вдовичев (раздел 1)

н.с., к.ф.-м.н.


06.11.12
подпись и дата

Н.В. Востоиков (раздел 4)

с.н.с., к.ф.-м.н.


06.11.12
подпись и дата

С.А. Гусев (раздел 1)

н.с., к.ф.-м.н.


06.11.12
подпись и дата

В.М. Данильцев (раздел 4)

с.н.с., к.ф.-м.н.


06.11.12
подпись и дата

Е.В. Демидов (разделы 3, 4)

н.с., к.ф.-м.н.


06.11.12
подпись и дата

К.Е. Спирин (разделы 1,4)

с.н.с., к.ф.-м.н.	<u>06.11.12. [подпись]</u> подпись и дата	Ю.Н. Ноздрин (раздел 1)
н.с., к.ф.-м.н.	<u>06.11.12 [подпись]</u> подпись и дата	Д.Н. Лобанов (разделы 1,4)
н.с., к.ф.-м.н.	<u>06.11.12 [подпись]</u> подпись и дата	А.Е. Парафин (раздел 1)
ведущий технолог	<u>06.11.12. [подпись]</u> подпись и дата	Е.А. Вopilкин (раздел 1)
м.н.с., к.х.н.	<u>06.11.12 [подпись]</u> подпись и дата	В.В. Травкин (раздел 1)
н.с., к.ф.-м.н.	<u>06.11.12 [подпись]</u> подпись и дата	А.Е. Пестов (раздел 7)
Технолог 1 категории	<u>06.11.12 [подпись]</u> подпись и дата	М.Н. Торопов (раздел 7)
технолог	<u>[подпись] 06.11.12</u> подпись и дата	А.Н. Тропанова (раздел 1)
Инженер исследователь	<u>[подпись] 06.11.12</u> подпись и дата	Е.Ю. Гудков (раздел 7)
Лаборант	<u>[подпись] 06.11.12</u> подпись и дата	А.В. Благодаткин (раздел 7)
м.н.с.	<u>[подпись] 06.11.12</u> подпись и дата	Д.В. Юрасов (раздел 4)
Студент	<u>[подпись] 06.11.12</u> подпись и дата	Л.И. Бударин (раздел 7)
Инженер- исследователь	<u>[подпись] 06.11.12</u> подпись и дата	Н.С. Гусев (раздел 7)
Инженер- исследователь	<u>[подпись] 06.11.12</u> подпись и дата	М.С. Доронин (раздел 7)
Студент	<u>[подпись] 06.11.12</u> подпись и дата	В.С. Дунаев (раздел 7)
м.н.с.	<u>[подпись] 06.11.12</u> подпись и дата	С.А. Королев (раздел 7)
Студент	<u>[подпись] 06.11.12</u> подпись и дата	К.В. Кремлев (раздел 7)

М.Н.С.

Путилов 06.11.12
подпись и дата

А.В. Путилов (раздел 7)

М.Н.С.

Юнин 06.11.12
подпись и дата

П.А. Юнин (разделы 1,2)

Нормоконтролер

Мурель 06.11.12
подпись и дата

А.В. Мурель

РЕФЕРАТ

Отчет 110 страниц, 2 таблицы, 40 рисунков, 30 источников, 7 приложений.

НИЗКОБАРЬЕРНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ, ПРИБОРЫ ВИДЕНИЯ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН, ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Выполнены запланированные научные исследования и работы по развитию Центра коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур».

Закупленное в рамках темы спецоборудование прошло этап пуско-наладочных работ и успешно введено в эксплуатацию (рентгеновский дифрактометр Bruker D8 Discover, генератор сигналов Agilent Technologies E8257D, атомно-силовой микроскоп Ntegra Prima, лазерный генератор микро-изображений μ PG101, вакуумные установки СММ-2000 и Amod 206, станция ожижения гелия Cryomech LHeP18 с системой сбора газообразного гелия, центрифуга для нанесения фоторезиста SPIN-1200D). Выполнены исследования в интересах сторонних организаций. Разработаны новые методики исследований и виды услуг, обновлен Перечень услуг ЦКП ИФМ РАН.

В результате теоретических исследований по низкобарьерным полупроводниковым диодам методами численного моделирования изучены процессы электронного транспорта в низкобарьерном диоде Мотта. Предложена методика выращивания структур для низкобарьерных диодов на основе GaAs в едином процессе газофазной эпитаксии. Созданы новые методики исследования структур с дельта-слоями и изготовленных на их основе низкобарьерных диодов. С их помощью выполнены экспериментальные исследования тестовых структур. Представлены результаты исследований по системе радиовидения 3-мм диапазона длин волн на основе диодов с пониженной высотой барьера. Экспериментально измерены значения вольт-ваттной чувствительности γ и пороговой мощности NEP планарного детектора, где низкобарьерный диод включается непосредственно в планарную антенну. Получены максимальные значения γ более 10000 В/Вт, лучшие значения NEP составили 10^{-12} Вт Гц^{-1/2}.

В области рентгеновской литографии выполнены работы по лазерно-плазменному источнику излучения, отражательной маске и системе освещения маски ЭУФ нанолитографа на рабочей длине волны $\lambda=13,5$ нм. Продемонстрированы литографические изображения в резистах, полученные с помощью метода проекционной литографии на длине волны 13,5 нм. Применительно к изучению супергладких подложек для многослойной рентгеновской оптики нанолитографа с рабочей длиной волны $\lambda=13,5$ нм показано, что наибольшей адекватностью обладает метод зеркального отражения.

СОДЕРЖАНИЕ

Обозначения и сокращения	8
ВВЕДЕНИЕ	9
1 Поставка спецоборудования и проведение пуско-наладочных работ	12
1.1 Вакуумная установка резистивного и электронно-лучевого испарения с холловским ионным источником Amod 206	12
1.2 Генератор сигналов Agilent Technologies E8257D	16
1.3 Станция ожижения гелия Cryomech LHeP18 с системой сбора газообразного гелия	18
1.4 Атомно-силовой микроскоп Ntegra Prima	21
1.5 Центрифуга для нанесения фоторезиста модели SPIN-1200D	25
1.6 Комплектующие для установки МЛЭ	27
2 Модернизация сайта ЦКП ИФМ РАН	29
2.1 Мотивация работ по обновлению сайта	29
2.2 Особенности программной реализации нового сайта	31
2.3 Составные части и построение сайта	31
3 Оценка рыночного потенциала полученных результатов	39
3.1 Оценка рыночного потенциала новых видов услуг ЦКП ИФМ РАН	39
3.2 Оценка рыночного потенциала результатов НИР по созданию диодов с пониженной высотой барьера и систем миллиметрового видения	41
4 Разработка рекомендаций об использовании полученных результатов, в том числе в реальном секторе экономики, а также в дальнейших исследованиях и разработках	44
4.1 Использование нового спецоборудования ЦКП ИФМ РАН в реальном секторе экономики, а также в дальнейших исследованиях и разработках	44
4.2 Использование новых методик и новых видов услуг ЦКП ИФМ РАН	49
4.3 Рекомендации по использованию результатов, полученных по исследованию низкобарьерных диодов на основе структур с дельта-слоями	51
5 Оформление отчетной документации в соответствии с требованиями Технического задания и актов Заказчика	52
6 Исследование параметров системы радиовидения миллиметрового диапазона длин волн и исследования в области рентгеновской литографии. (Внебюджетное финансирование)	55

6.1 Исследование параметров системы радиовидения миллиметрового диапазона длин волн	55
6.2 Лазерно-плазменный источник ЭУФ излучения для рентгеновской литографии	61
6.2.1 Введение	61
6.2.2 Описание лазерно-плазменного источника	62
6.2.3 Экспериментальные результаты	64
6.2.4 Обсуждение результатов	67
7 Работы, выполненные на предыдущих этапах НИР	69
7.1 Развитие Центра коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур»	69
7.1.1 Оборудование, приобретенное в рамках госконтракта	69
7.1.2 Разработка новых методик измерений и новых видов услуг	72
7.1.3 Предоставление услуг сторонним организациям-заказчикам	75
7.1.4 Разработка программы развития ЦКП ИФМ РАН	76
7.2 Исследования по формированию диодов с пониженной высотой барьера и детекторных структур на их основе	77
7.2.1 Теоретическая модель высокочастотного отклика микроструктур, учитывающая нестационарные и пролётные эффекты электронного транспорта в низкобарьерных диодах	78
7.2.2 Лабораторные технологии формирования низкобарьерных контактов металл-полупроводник и формирования планарных диодов на их основе	79
7.2.3 Исследование характеристик планарного детектора	81
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	88
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	90
Приложение А Перечень организаций – заказчиков исследований	93
Приложение Б Справка о метрологическом обеспечении измерений ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур»	94
Приложение В Перечень сертифицированного оборудования. Перечень аттестованных методик ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур»	96
Приложение Г Актуализированный перечень услуг ЦКП ИФМ РАН	100
Приложение Д Перечень закупленного оборудования	104
Приложение Е Лабораторная технология металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ), обеспечивающая формирование низкобарьерных контактов металл-полупроводник	106
Приложение Ж Лабораторная технология формирования планарных диодов на основе низкобарьерных контактов металл-полупроводник	108

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применяются следующие обозначения и сокращения:

- МЛЭ - молекулярно-лучевая эпитаксия;
- МОГФЭ – металлоорганическая газофазная эпитаксия;
- АСМ – атомно-силовая микроскопия;
- ПЭМ - просвечивающая электронная микроскопия;
- ВИМС – вторично ионная масс-спектрометрия;
- РД - рентгеновская дифрактометрия
- ФЛ - фотолюминесценция;
- КТ – квантовая точка;
- КЯ – квантовая яма;
- ТМГ – триметилгаллий;
- ТЭБ – триэтилбор;
- ТМИ – триметилиндий;
- МС – монослой, слой монокристалла, по толщине совпадающий с периодом повторения кристалла в направлении нормали к поверхности;
- МП – металл-полупроводник;
- ВАХ – вольт-амперные характеристики;
- ЭУФ – экстремальный ультрафиолет;
- АЦП - аналого-цифровой преобразователь;
- МК – микроконтроллер;
- БУ - буферный усилитель;
- ПЧ - промежуточная частота
- ЛОВ - лампа обратной волны
- ЭУФ – экстремальный ультрафиолет

ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР является государственный контракт №16.552.11.7007 от "29" апреля 2011г. по теме "Развитие центром коллективного пользования научным оборудованием комплексных исследований в области формирования и исследования многослойных наноструктур на основе Si, GaAs и GaN для пассивных и активных элементов нанoeлектроники и нанофотоники миллиметрового и инфракрасного диапазонов длин волн", выполняемый в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы».

В области научных исследований проект направлен на решение проблемы получения изображений объектов в миллиметровом диапазоне длин волн в реальном масштабе времени на основе матриц высокочувствительных планарных детекторов, созданных методами нанотехнологий. В ходе проекта доказана возможность создания компактного матричного детекторного приёмника миллиметрового диапазона длин волн.

Основной объем финансирования по проекту направлен на развитие Центра коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур», ЦКП ИФМ РАН, закупку спецоборудования и развитие методик исследований.

В Техническом задании на этапе 4 «Обобщение и оценка результатов исследований» было предусмотрено выполнение следующих работ:

1. Поставка спецоборудования и проведение пуско-наладочных работ.
2. Модернизация сайта ЦКП ИФМ РАН.
3. Оценка рыночного потенциала полученных результатов.
4. Разработка рекомендаций об использовании полученных результатов, в том числе в реальном секторе экономики, а также в дальнейших исследованиях и разработках.
5. Оформление отчетной документации в соответствии с требованиями Технического задания и актов Заказчика.
6. Исследование параметров системы радиовидения миллиметрового диапазона длин волн и исследования в области рентгеновской литографии. (Внебюджетное финансирование.)

В настоящем отчете приведены результаты выполненных работ на этапе 4 и в целом по госконтракту.

В разделе 1 описаны пуско-наладочные работы по вновь закупленному оборудованию на этапе 4: вакуумная установка резистивного и электронно-лучевого испарения с холловским ионным источником Amod 206; генератор сигналов Agilent Technologies E8257D; станция ожижения гелия Cryomech LHeP18 с системой сбора газообразного гелия; атомно-силовой микроскоп Ntegra Prima; центрифуга для нанесения фоторезиста модели SPIN-1200D; комплектующие для установки МЛЭ. В расширенном виде информация по всему оборудованию, закупленному в рамках госконтракта

на этапах 1-4, представлена в подразделе 7.1.1. Проведенные закупки, на которые было потрачено более 89% бюджетного финансирования по НИР, существенно расширили возможности ЦКП ИФМ РАН, создав предпосылки для успешного выполнения исследований в области микро- и наноструктур как в базовом Институте физики микроструктур, так и на предприятиях региона, для которых ЦКП ИФМ РАН выполняет заказы.

Выполненные на этапе 4 работы по модернизации сайта ЦКП ИФМ РАН представлены в разделе 2, где обсуждены мотивация, особенности программной реализации сайта и его составные части.

В разделе 3 выполнена оценка рыночного потенциала новых видов услуг ЦКП ИФМ РАН и результатов по созданию диодов с пониженной высотой барьера для систем миллиметрового видения.

В разделе 4 приведены рекомендации об использовании полученных результатов, в том числе, в реальном секторе экономики, а также в дальнейших исследованиях и разработках. Отдельно обсуждены рекомендации по использованию нового спецоборудования с учетом его особенностей, новых методик и новых видов услуг ЦКП ИФМ РАН в реальном секторе экономики, а также в дальнейших исследованиях и разработках. Даны рекомендации по использованию результатов, полученных по исследованию низкобарьерных диодов на основе структур с дельта-слоями.

Раздел 5 посвящен описанию работ по оформлению отчетной документации в соответствии с требованиями Технического задания и актов Заказчика.

За счет внебюджетных средств выполнены разработки в области изучения параметров системы радиовидения миллиметрового диапазона длин волн и рентгеновской литографии (раздел 6). В области рентгеновской литографии выполнены работы по лазерно-плазменному источнику излучения, отражательной маске и системе освещения маски ЭУФ нанолитографа на рабочей длине волны $\lambda=13,5$ нм.

В разделе 7 в кратком виде приводятся результаты, полученные на предыдущих этапах НИР. Эти результаты были ранее приведены в промежуточных отчетах о НИР по этапам 1 – 3. В подразделе 7.1 кратко описаны работы по развитию ЦКП ИФМ РАН, выполненные на предыдущих этапах 1-3: закупка нового оборудования, разработка новых методик и новых видов услуг, предоставление услуг сторонним организациям, работа по составлению новой Программы развития ЦКП ИФМ РАН. В подразделе 7.2 описаны работы по формированию диодов с пониженной высотой барьера. Это, в частности, аналитический обзор современной литературы, который показал актуальность тематики, направленной на создание устройств для приема и генерации электромагнитного излучения в терагерцовой области частот. Далее последовательно описано, как были решены теоретические вопросы задачи о движении носителей заряда в этих диодах, отработана лабораторная технология металлоорганической газофазной эпитаксии, обеспечивающая формирование низкобарьерных контактов металл-полупроводник, формирование планарных

диодов на основе низкобарьерных контактов, а также результаты исследования характеристик планарного детектора, подтвердившее достижение заявленных характеристик.

Запланированные в ТЗ и КП на этапе 4 и в целом по НИР значения индикаторов и показателей Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» были достигнуты.

1 ПОСТАВКА СПЕЦОБОРУДОВАНИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ПУСКО-НАЛАДОЧНЫХ РАБОТ

В разделе описаны пуско-наладочные работы по вновь закупленному на этапе 4 оборудованию, приводится краткая характеристика оборудования и примеры использования.

1.1 Вакуумная установка резистивного и электронно-лучевого испарения с холловским ионным источником Amod 206

Важным этапом изготовления лабораторных образцов нано- и микроструктур является хорошо воспроизводимое осаждение тонких и ультра-тонких слоёв различных материалов, позволяющее сформировать надежные электрические контакты, а так же диэлектрические, полупроводниковые и металлические пленки высокого структурного качества. Обычно в процессе изготовления образцов требуется использование нескольких различных методов осаждения функциональных материалов, которые зачастую реализованы в разных технологических установках. Это накладывает ряд дополнительных требований к лабораторному помещению (класс чистоты, glow-box с инертной атмосферой, переходные шлюзы между установками). Преимущество установки физического осаждения в вакууме Amod 206 производства компании Angstrom Engineering состоит в том, что в ней одновременно реализованы методы резистивного термического испарения и испарения электронным лучом. Установка имеет достаточно большую 20-ти дюймовую кубическую рабочую камеру (материал - алюминий), внутри которой располагаются:

- Столик для образцов, оборудованный:

1. Нагревателем на основе кварцевой лампы (ИК-нагрев), позволяющим устанавливать и поддерживать заданную температуру столика в диапазоне от 20 до 600 °С. Температура подложки автоматически контролируется бесконтактной термопарой. Нагреватель позволяет отжигать осаждаемые пленки в процессе осаждения, либо впоследствии.
2. Автоматической заслонкой с пневматическим приводом.
3. Механизмом вращения с регулировкой оборотов столика в диапазоне от 0 до 50 об./мин. Вращение столика способствует более равномерному распределению материала в объеме формируемой пленки.

- Два источника резистивного термического испарения. В качестве тиглей для металлов, таких как Au, Ag, Cu, Al, используются открытые лодочки и витые проволочные нити из вольфрама. Напряжение, подаваемое на источники, может задаваться как автоматически (по библиотеке рецептов термического осаждения различных материалов), так и в ручном режиме.

- Один шеститигельный (тигли графитовые объемом 7 куб.см.) источник электронно-лучевого испарения Telemark револьверного типа. Источник снабжен автоматизированным контроллером рецептов с индексацией тиглей и программируемым контроллером электронного луча по двум

осям. Доступен ручной режим контроля мощности, времени осаждения и выбора тигля. Благодаря широким возможностям настройки оборудования процессы термического резистивного (испарение из одного или соиспарение двух источников) и электронно-лучевого испарения могут быть задействованы как по отдельности, так и совместно.

- Три охлаждаемых кварцевых пьезорезонатора с рабочей частотой 6 МГц, позволяющих контролировать скорость осаждения материалов с помощью автоматизированной системы SQM-242 Sigma.

- Ионный источник Kaufman and Robinson EN400, предназначенный для предварительного травления образцов.

- Предельное остаточное давление в 10^{-7} Торр обеспечивается безмасляным насосом модели TriScroll Dry Pump Varian и криогенным насосом Cryo-Torr 8F (производство Brooks Automation).

Установка была успешно введена в эксплуатацию, на рисунке 1.1 показано фото установки, на рисунке 1.2 - образцы осажденных в процессе тестовых испытаний металлических пленок.



Рисунок 1.1 Установка Amod 206 – вакуумный пост, в лаборатории ЦКП ИФМ РАН



Рисунок 1.2 Образцы металлических пленок, полученные при тестовых испытаниях

Качество пленок подтверждено рентгенодифракционным исследованием на приборе Bruker D8 Discover, закупленном ранее в рамках настоящего госконтракта. На рисунке 1.3 показан спектр $\omega/2\theta$ - сканирования образца с титановым покрытием (черная линия) и линии спектра титана из базы порошковых данных PDF-2, также закупленной в комплекте D8 Discover.

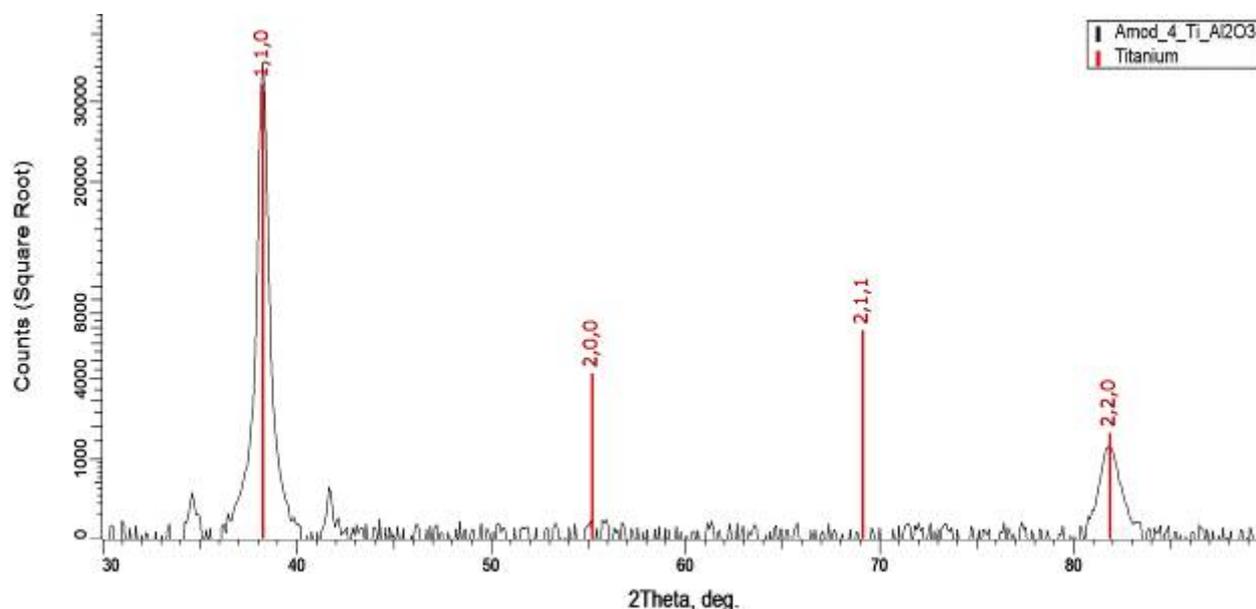


Рисунок 1.3 Экспериментальный рентгенодифракционный спектр $\omega/2\theta$ - сканирования образца с титановым покрытием (черная линия) и линии спектра титана из базы порошковых данных PDF-2.

Видно, что присутствует только фаза Ti. Кроме того, видно, что пик (110) сильнее, чем в базе данных, что говорит о преимущественной ориентации кристаллитов в слое покрытия.

Степень упорядоченности характеризуется углом рассеяния текстуры и измеряется по спектру ω -сканирования пика Ti(110). Рисунок 1.4 показывает, что упорядоченность довольно сильная, ширина пика 2° .

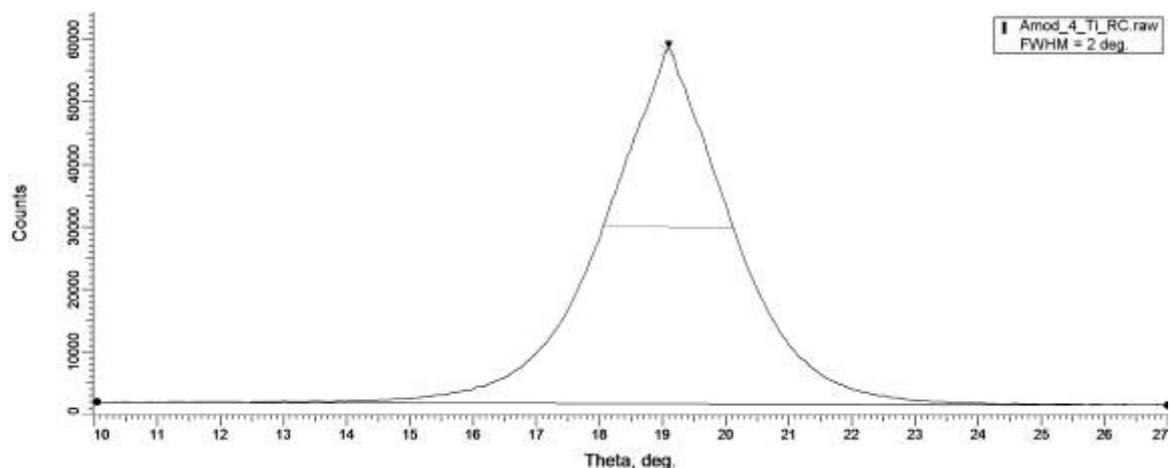


Рисунок 1.4 Экспериментальный рентгенодифракционный спектр ω - сканирования пика Ti(110) образца с титановым покрытием

Выполнена также рентгеновская рефлектометрия – другой метод исследования слоев, реализованный на D8 Discover. Спектр того же образца и полученная информация показаны на рисунках 1.5 и 1.6. В спектре (рисунок 1.5) четко видны осцилляции, связанные с интерференцией рентгеновских волн, отраженных от границ слоя. Это говорит о гладкости слоя и позволяет оценить толщину.

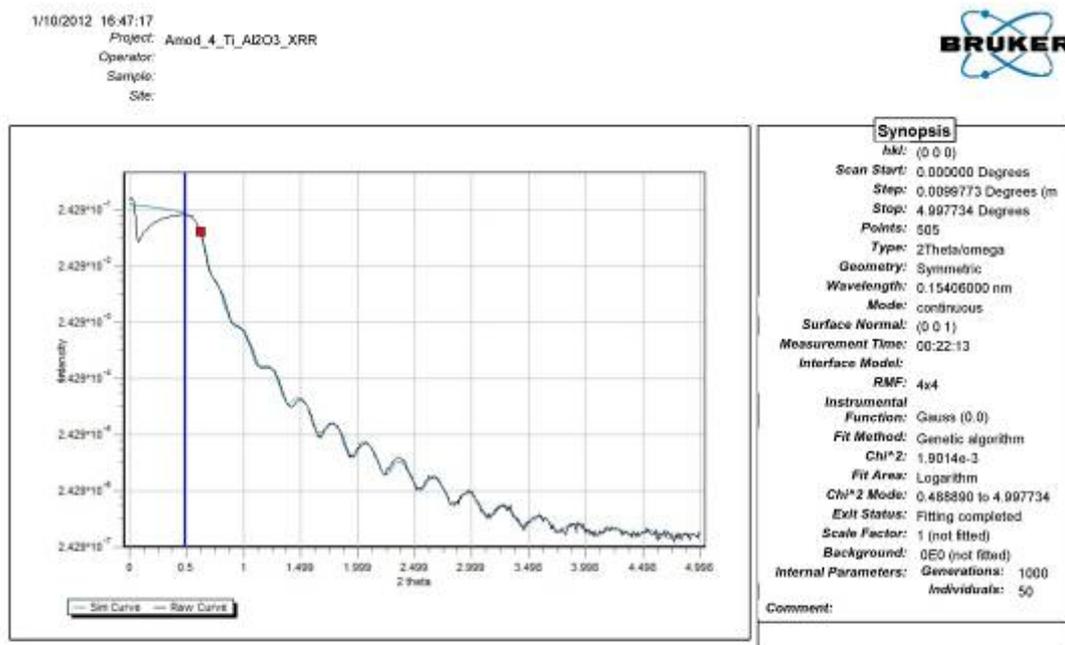


Рисунок 1.5 Рентгеновская рефлектометрия образца с титановым покрытием

Наиболее надежна оценка подгонкой вычисленного спектра к экспериментальному. Для данного образца получены оценки (рисунок 1.6): толщина слоя 28 нм, шероховатость поверхности 1,4 нм, на поверхности – переходный слой 2,5 нм, шероховатость 2 нм. Плотность слоя близка к плотности сплошного титана.

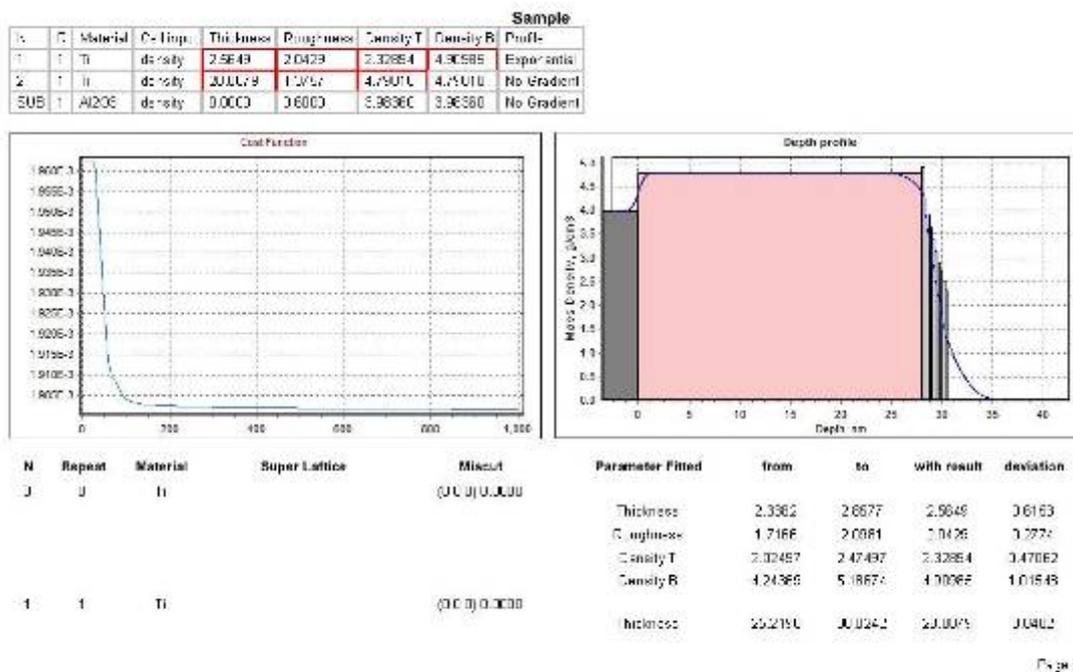


Рисунок 1.6 Параметры покрытия, определенные по данным рентгеновской рефлектометрии (толщина, плотность, шероховатость границ).

Таким образом, подтверждена возможность нанесения контактных металлических слоев на новой установке Amod 206.

1.2 Генератор сигналов Agilent Technologies E8257D

Интерес к исследованиям в субтерагерцовом и терагерцовом диапазонах в различных областях науки, таких как спектроскопия, радиоастрономия, медицина, биология, мониторинг окружающей среды, стимулирует развитие высокочастотной техники приёмных устройств. По сравнению с хорошо освоенными диапазонами, измерения на этих частотах затруднены. Основными элементами высокочастотных приёмников являются генераторы, смесители и детекторы. В настоящее время большой интерес вызывают, в частности, планарные диоды на основе полупроводниковых сверхрешёток. Для проведения измерений высокочастотных характеристик смесителей на сверхрешётках требуются генераторы, имеющие спектрально чистый выходной сигнал с кварцевой стабильностью частоты в миллиметровом диапазоне длин волн. Такие

генераторы должны обладать мелким шагом выходной частоты и иметь большую мощность сигнала.

Маркетинговый анализ показал, что для данных измерений наиболее хорошо подходит генератор сигналов E8257D фирмы Agilent Technologies (США). Прибор был приобретен и установлен в ИФМ РАН, см. внешний вид на рисунке 1.7.



Рисунок 1.7 Генератор сигналов Agilent Technologies E8257D.

Прибор был успешно запущен в эксплуатацию. В качестве примера его использования приведем измерение предельной рабочей частоты смесителя на сверхрешётке.

Измерительная установка состояла из исследуемого смесителя, двух генераторов, один из которых - перестраиваемый генератор сигналов Agilent Technologies E8257D. Сигналы генераторов смешивались в смесителе. Промежуточная частота с выхода смесителя подавалась на анализатор спектра, рисунок 1.8.

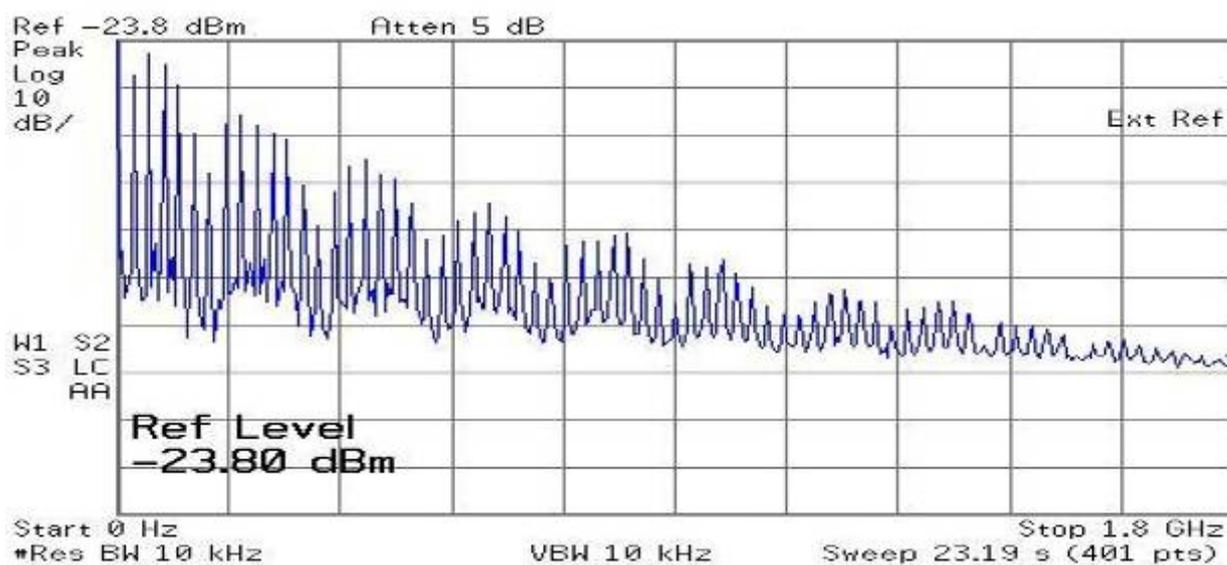


Рисунок 1.8 Спектр сигнала промежуточной частоты F_{if} .

Поскольку на смеситель подавались сигналы разных частот F_s и F_g от двух генераторов, то в смесителе возникают низкочастотные сигналы биений между гармониками с частотами mF_s и nF_g . возникающие сигналы будут иметь частоты

$$kF_{if} = mF_s - nF_g \quad (1),$$

где k , m и n – целые числа. Перестраивая частоту F_g на известную величину, по смещению частоты F_{if} на экране анализатора спектра, можно вычислить номера гармоник k , m и n сигналов в исследуемом диоде. Зная частоту сигнала и его наибольший номер гармоники, удастся вычислить предельную рабочую частоту смесителя, не применяя измерительную терагерцовую аппаратуру. Таким образом, благодаря большой выходной мощности и плавной перестройке частоты удастся возбудить дальние гармоники, лежащие в терагерцовом диапазоне частот, и точно определить частоту.

1.3 Станция ожижения гелия Cryomech LHeP18 с системой сбора газообразного гелия

В Центре коллективного пользования "Физика и технология микро- и наноструктур" активно ведутся экспериментальные исследования полупроводниковых, металлических и сверхпроводящих гетеро- и наноструктур широком интервале температур и при наличии сильных магнитных полей. Такие исследования часто требуют использования современных криостатов, охлаждаемых жидким гелием. Спектр криогенного оборудования в ЦКП ИФМ РАН достаточно широкий, количество различных криогенных установок постоянно растет, что обеспечивает возможность проводить исследования при экстремальных условиях (в сверхнизких температурах и при сильных магнитных полях) на мировом уровне. Так, например, в конце 2010 года введен в

строй гелиевый криостат производства компании РТИ (Россия) с соленоидом на 12 тесла, а в 2011 году сверхвысоковакуумный низкотемпературный сканирующий туннельный микроскоп производства компании Омикрон (Германия).

Приобретение ЦКП ИФМ РАН гелиевого ожижителя Cryomech LHeP18 с системой сбора газообразного гелия позволило заметно снизить потери гелия при проведении низкотемпературных исследований, доведя рециркуляцию использования газа до трех раз. Потери гелия при экспериментах не превышают 30 % объема газа, в то время как до приобретения установки ожижения и ввода в эксплуатацию системы сбора потери доходили до 100%. Кроме того, наличие собственной системы ожижения позволило избавиться от необходимости для исследователей составлять график проведения экспериментов в соответствии с графиком работы внешних организаций, производящих жидкий гелий.

Установленная в ИФМ РАН система сбора и ожижения гелия размещена в двух смежных помещениях и разделяется по функциональному назначению. В помещении №1 (Рисунок 1.9) размещена система очистки газообразного гелия до состояния 0.9999% и система ожижения, состоящая из компрессора и бака для приема жидкого газа.



Рисунок 1.9 Установка по ожижению гелия (Cryomech LHeP18) и система очистки газа в лаборатории ЦКП ИФМ РАН. На рисунке: 1-система очистки, 2- компрессор гелиевого ожижителя, 3- сосуд для жидкого гелия.

В помещении № 2 размещаются (Рисунок 1.10) шар – пилот (газгольдер) для приема газообразного гелия от потребителя через систему сбора, объемом 8,5 м³.



Рисунок 1.10 Элементы системы сбора гелия ЦКП ИФМ РАН. На рисунке: 1-Газгольдер объемом 8.5 м^3 , 2- компрессор высокого давления (до 150 атм).

Объем газгольдера специально подбирался, исходя из потребностей потребителей, и соответствует оптимальному объему, необходимому для экономии ресурса закачного компрессора. После наполнения газгольдера газом, автоматически, по сигналу с лазерных датчиков, происходит включение закачного компрессора, который закачивает гелий в баллоны высокого давления, Рисунок 1.11.



Рисунок 1.11 Рампа с баллонами высокого (до 150 атм.) давления для хранения газообразного гелия.

Весь процесс ожижения и сбора гелия может быть автоматизирован, для чего в Гелиевом ожижителе Cryomech LHeP18 присутствуют современные электронные блоки управления. Для объединения схемы управления в единый центр на каждом блоке управления предусмотрен разъем RS-232, что позволяет подключать блоки к ЭВМ. Изображение электронных табло блоков управления различных частей установки представлено на рисунке 1.12.



Рисунок 1.12 Панели управления различными частями установки: Блок управления ожижителем (слева) и панель управления закачным компрессором (справа).

1.4 Атомно-силовой микроскоп Ntegra Prima

Для работ, выполняемых ЦКП ИФМ РАН, актуальной является проблема аттестации дефектов формы сверхгладких (шероховатость субнанометрового уровня) поверхностей в широком диапазоне пространственных частот. Это важная часть целого ряда задач современной коротковолновой оптики (ультрафиолетовое, экстремальное ультрафиолетовое и мягкое рентгеновское излучение). При изготовлении оптических элементов для приборов и систем изображающей оптики дифракционного качества (пространственное разрешение определяется дифракцией света), востребованных для современной нанолитографии, микроскопии, лазерной техники специального назначения, систем глобального наблюдения за поверхностью Земли, требования на допустимые дефекты (шероховатости) поверхности составляют 3-5 ангстрем в диапазоне пространственных частот $10^{-6} - 10^3 \text{ мкм}^{-1}$ (диапазон латеральных размеров от метра до 1 нм). Если в диапазоне пространственных частот $10^{-6} - 10^3 \text{ мкм}^{-1}$ (в оптике дефекты поверхности в этом диапазоне относят к дефектам формы) разработанные в последние годы интерферометры с дифракционной волной сравнения обеспечивают требуемую точность измерений, то в области частот $10^{-3} - 10^3 \text{ мкм}^{-1}$ (дефекты поверхности в этом диапазоне называю среднечастотными и

высокочастотными шероховатостями) результаты измерений, выполненные в различных группах с использованием одних и тех же методов, дают противоречивые результаты.

Шероховатости среднечастотного диапазона измеряются в ЦКП ИФМ РАН с помощью оптической интерференционной микроскопии на приборе Talysurf CCI-2000, приобретенном ранее при выполнении госконтракта по мероприятию 5.2. Традиционно для измерения шероховатостей в коротковолновом диапазоне используют атомно-силовую микроскопию (АСМ), однако поле зрения таких приборов ограничено и существовал зазор в частотном диапазоне, где не было прибора измерения шероховатости.

Для решения этой проблемы был приобретен атомно-силовой микроскоп Ntegra Prima фирмы НТ-МДТ, Россия. Установка оснащена уникальным модулем виброзащиты, состоящим из системы подвесов, позволяющих уменьшить влияние внешних воздействий в процессе измерений. Так же есть в наличии оптический микроскоп, который позволяет сделать точное позиционирование по кадру. Латеральный размер измеряемых кадров до 100 мкм. Благодаря программе сшивки кадров, удастся увеличить размеры измеряемых кадров до 200-250 мкм. Другие важные особенности прибора:

- Наличие емкостных датчиков перемещения с самым низким уровнем собственного шума (могут быть использованы на полях сканирования <100 нм).
- Оптический микроскоп с разрешением до 1 мкм.
- Возможность осуществлять сканирование как образцом (наименьший уровень шумов, наилучшее разрешение на малых полях сканирования), так и зондом (максимальный диапазон сканирования, возможность работы с массивными образцами).
- Более 40 измерительных методик, включая уникальные.
- Возможность проведения измерений на воздухе, в контролируемой атмосфере, жидкости.

Технические характеристики прибора приведены на рисунке 1.13.

Сканирующая Зондовая Микроскопия			
На воздухе и в жидкости: АСМ (контактная + полуконтактная + бесконтактная) / Латерально-Силовая Микроскопия/ Отображение Фазы/ Модуляция Силы/ Отображение Адгезионных Сил/ Литографии: АСМ (Силовая)			
Только на воздухе: СТМ/ МСМ/ ЭСМ/ СЕМ/ Метод Зонда Кельвина/ Отображение Сопротивления Растекания/ AFAM (по требованию)/Литографии: АСМ (Токовая), СТМ/			
Технические характеристики		Тип сканирования	
		Сканирование образцом	Сканирование зондом*
Размер образца		До 40 мм в диаметре, до 15 мм в высоту	До 100 мм в диаметре, до 15 мм в высоту
Вес образца		До 100 г	До 300 г
XY позиционирование образца		5x5 мм	
Разрешение позиционирования		разрешение - 5 мкм минимальное перемещение - 2 мкм	
Поле сканирования		100x100x10 мкм 3x3x2,6 мкм	100x100x10 мкм 50x50x5 мкм
		До 200x200x20 мкм** (метод DualScan™)	
Нелинейность, XY (с датчиками обратной связи)		≤0.1%	≤0.15%
Уровень шума, Z (СКВ в полосе 1000 Гц)	С датчиками	0.04 нм (типично), 0.06 нм	0.06 нм (типично), 0.07 нм
	Без датчиков	0.03 нм	0.05 нм
Уровень шума, XY*** (СКВ в полосе 200 Гц)	С датчиками	0.2 нм (типично), 0.3 нм (XY 100 мкм)	0.1 нм (типично), 0.2 нм (XY 50 мкм)
	Без датчиков	0.02 нм (XY 100 мкм), 0.001 нм (XY 3 мкм)	0.01 нм (XY 50 мкм),
Ошибка измерения линейных размеров (с датчиками)		±0.5%	±1.2%
Система видеонаблюдения	Оптическое разрешение	1 мкм (0.4 мкм по требованию, NA 0.7)****	3 мкм
	Поле зрения	4.5-0.4 мм	2.0-0.4 мм
	Непрерывный зум	возможно	возможно
Виброизоляция	Активная	0.7-1000 Гц	
	Пассивная	выше 1 кГц	

Рисунок 1.13 Технические характеристики атомно-силового микроскопа Ntegra Prima

Основные методики измерения, реализованные в приборе:

1. Контактная атомно-силовая микроскопия (с-AFM):

- топография (рельеф) поверхности,

- пространственное распределение коэффициента трения,
 - пространственное распределение микротвердости.
2. Полуконтактная атомно-силовая микроскопия (sc-AFM):
- топография (рельеф) поверхности,
 - пространственное распределение свойств материалов (фазовый контраст) в гетерофазных системах, биологических объектах, полимерах и др.
3. Сканирующая туннельная микроскопия (STM):
- топография (рельеф) поверхности проводящих образцов,
 - туннельная спектроскопия.
4. Магнитная силовая микроскопия (MFM):
- пространственное распределение магнитных сил,
 - визуализация магнитных доменных структур.
5. Электростатическая силовая микроскопия (EFM):
- пространственное распределение электрического поля и зарядов на поверхности,
 - визуализация доменной структуры сегнетоэлектриков.
6. Метод зонда Кельвина (KPFM):
- пространственное распределение электростатического потенциала и зарядов на поверхности,
 - визуализация доменной структуры сегнетоэлектриков.
7. Сканирующая емкостная микроскопия (SCM):
- пространственное распределение диэлектрических свойств поверхности,
 - определение концентрации и типа носителей заряда.
8. Силовая микроскопия пьезоотклика (PFM):
- исследование кинетики локального переключения поляризации в сегнетоэлектриках,
 - визуализация доменной структуры сегнетоэлектриков.
9. Нанолитография:
- силовая литография в полимерных материалах,
 - токовая литография (анодное окисление, локальное переключение поляризации),
 - векторный и растровый режимы.

Прибор был размещен в помещении ЦКП ИФМ РАН, см. фото на рисунке 1.14, и запущен в эксплуатацию.



Рисунок 1.14 Вид атомно-силового микроскопа Ntegra Prima в лаборатории ЦКП ИФМ РАН

На рисунке 1.15 показано изображение тестового объекта, полученное с помощью Ntegra Prima.

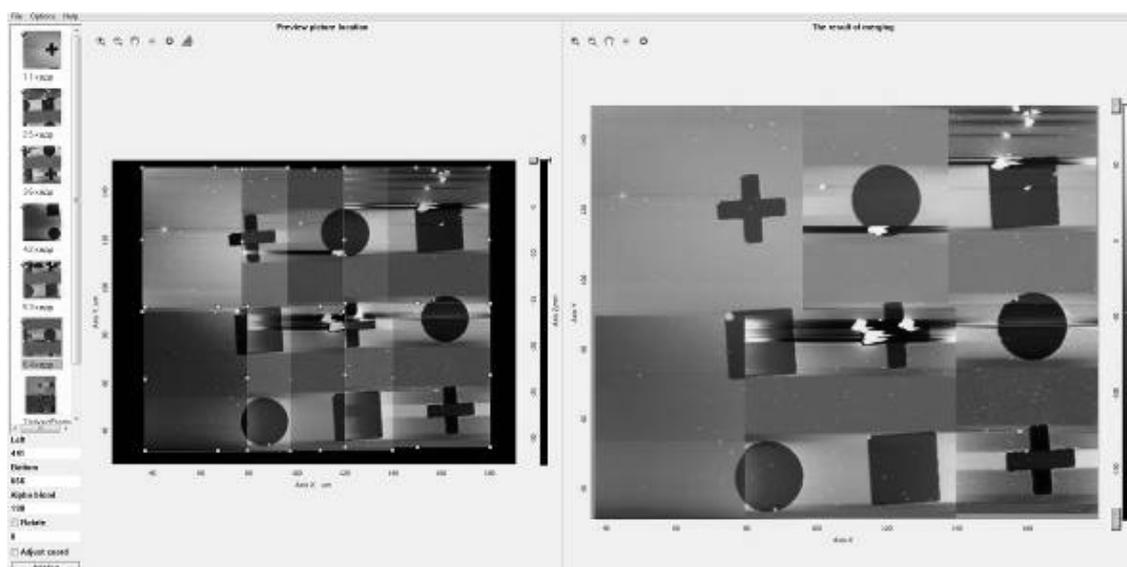


Рисунок 1.15 Изображение, полученное с помощью атомно-силового микроскопа Ntegra Prima

1.5 Центрифуга для нанесения фоторезиста модели SPIN-1200D

Тестовые и рабочие структуры, исследуемые в ЦКП ИФМ РАН, в большинстве своем формируются методом литографии. В последнее время происходит переход на подложки повышенного размера, до 4-х дюймов, что заставляет изменять устройство нанесения фоторезиста, используемое в процессе литографии.

Новая центрифуга для нанесения фоторезиста модели SPIN-1200D производства фирмы MIDAS System Co., Ltd. (Корея) в комплекте с держателями пластин предназначена для нанесения фоторезиста в лабораторных условиях ЦКП ИФМ РАН в составе литографической установки. Центрифуга необходима для равномерного, точного и воспроизводимого нанесения слоя фоторезиста на пластины большого размера, диаметром до 4 дюймов, а также на куски подложек. Центрифуга была закуплена и введена в эксплуатацию. Общий вид центрифуги SPIN-1200D показан на Рисунке 1.16.



Рисунок 1.16 Общий вид центрифуги для нанесения фоторезиста модели SPIN-1200D производства фирмы MIDAS System Co., Ltd. (Корея)

Комплект вакуумных держателей для подложек и кусков подложек приведен на Рисунке 1.17.



Рисунок 1.17 Комплект вакуумных держателей подложек размером 4 и 2 дюйма и кусков подложек

На Рисунке 1.18 приведена фотография держателя кусков подложек с установленным образцом.

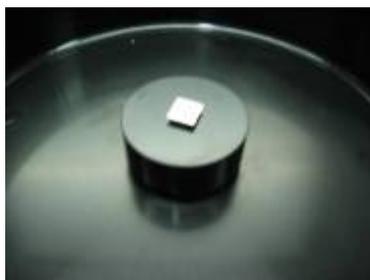


Рисунок 1.18 Вакуумный держатель кусков подложек с установленным образцом.

Держатель для кусков подложек позволяет наносить фоторезист не только на круглые полупроводниковые подложки, но и на квадратные, прямоугольные, а также неправильной формы.

Данная центрифуга, по сравнению с существующей, кроме большего диаметра пластин обеспечивает более равномерное точное и воспроизводимое нанесение фоторезиста и минимизацию размеров валика фоторезиста по краю образца не только на круглых подложках, но и на кусочках пластин, что очень важно для лабораторной технологии. Уменьшение толщины валика фоторезиста по краю образца позволит получить лучший оптический контакт с фотошаблоном и достигнуть разрешения 1 мкм.

Основные характеристики центрифуги SPIN-1200D:

- Размер чаши: 8 дюймов.
- Ускорение и скорость вращения: задается оператором.
- Управление: память на 20 рецептов - в каждом рецепте 50 шагов (ускорение, скорость вращения держателя, время вращения).
- Скорость вращения держателя: 300-8000 об./мин \pm 1%.
- Время вращения: 1-999 сек.
- Размер образцов: от кусочков до 4 дюймовых пластин (комплект вакуумных держателей).
- Сервомотор постоянного тока.
- Корпус из нержавеющей стали.
- Безмасляный вакуум (вакуумный насос в комплекте).

1.6 Комплектующие для установки МЛЭ

Кроме закупки нового аналитического оборудования ЦКП ИФМ РАН постоянно проводит работу по поддержанию работоспособности эксплуатируемого оборудования, закупкам необходимых материалов и оборудования. В частности, при выполнении настоящего госконтракта была использована установка молекулярно-лучевой эпитаксии для создания низкобарьерных диодов на основе структур Si/Ge с дельта-легированием сурьмой приповерхностного слоя, см.

описание результатов экспериментов в п. 4.1 отчета о НИР по этапу 1 настоящего госконтракта. Планируется, что в распоряжение ЦКП ИФМ РАН поступит молекулярно-лучевая установка для выращивания совершенных слоев полупроводниковых нитридов. Возникла необходимость доукомплектации установки несколькими позициями: газовая линия подачи чистого азота в плазменный источник установки МЛЭ; стартовый комплект материалов для проведения работ по технологическому запуску установки МЛЭ; молекулярный источник для установки молекулярно-лучевой эпитаксии. Возможность выделения средств появилась в результате уменьшения первоначально запланированной суммы закупок по другим позициям. Это позволило провести необходимую для ЦКП покупку комплектующих для МЛЭ.

2 МОДЕРНИЗАЦИЯ САЙТА ЦКП ИФМ РАН

2.1 Мотивация работ по обновлению сайта

Почти сразу с образованием Центра коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур» в 2003 году встал вопрос о представительстве Центра в глобальной сети «Интернет». До последнего времени информация о ЦКП была размещена на сайте Института физики микроструктур (см. Рисунок 2.1) в виде одного из разделов. Однако, с расширением ЦКП, увеличением материально технической базы, расширением работы с молодыми кадрами информации о ЦКП, требующей отображения на сайте, стало достаточно много. Кроме того, информация о ЦКП, размещенная на основном сайте ИФМ РАН, находилась на интернет-страницах второго-третьего уровней, что в свою очередь затрудняло поиск информации о Центре для заинтересованных пользователей.

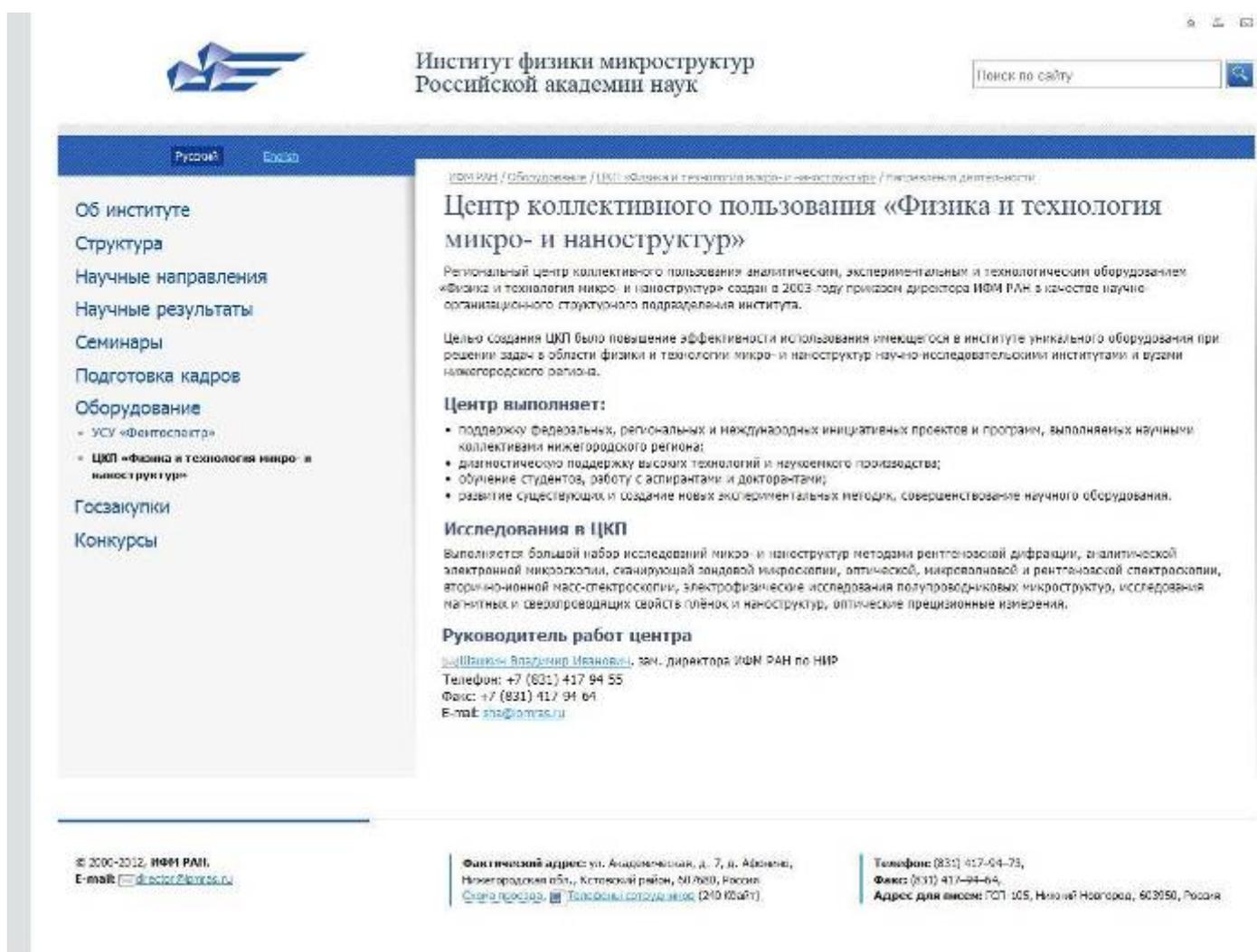


Рисунок 2.1 Начальная версия главной Интернет-станции ЦКП ИФМ РАН на сайте ИФМ.

Ввиду этого возникла необходимость организации отдельной Интернет-площадки, посвященной непосредственно Центру коллективного пользования, а так же индексации данного ресурса в интернет-поисковых системах с целью облегчения процесса нахождения информации о ЦКП. Такой Интернет ресурс был создан в 2012 году по адресу <http://ipmckp.ru/> в рамках выполнения настоящего госконтракта.

На Рисунке 2.2 представлен вид главной страницы обновленного сайта ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур». В новой версии сайта были сохранены основные подразделы старой версии, но содержание разделов было расширено. Новый дизайн сайта, оснащенный высококачественными фотографиями высокого разрешения, стал более удобен и информативен для пользователя.



Рисунок 2.2 Вид главной страницы обновленного сайта ЦКП ИФМ РАН <http://ipmckp.ru/>

2.2 Особенности программной реализации нового сайта

Новый сайт реализован с использованием скриптового языка программирования PHP, который по сравнению с HTML (на котором был реализован первый вариант сайта Центра) обладает рядом заметных преимуществ. Возможности HTML сильно ограничены, этот код не обладает ни динамичностью, ни гибкостью. HTML в чистом виде не позволяет динамически управлять контентом. Например, HTML не позволяет настроить страницу в зависимости от браузера и операционной системы, в которой она просматривается пользователем Интернета. Разметка HTML не дает возможность создавать и персональные настройки.

PHP позволяет генерировать оригинальные страницы в зависимости от самых разнообразных настроек, включая тип операционной системы, браузер и время суток. При этом сценарии на PHP могут обрабатывать электронную почту и активно работать с файлами и базами данных. С использованием последних возможностей PHP в будущем планируется продолжать развивать и совершенствовать сайт ЦКП.

Кроме того, PHP относится к языкам программирования, сценарии на которых исполняются на стороне сервера, в отличие от таких скриптовых языков программирования, как JavaScript, сценарии на которых исполняются браузером на стороне клиента. Это означает, что пользователь сайта, не обладающий компьютером высокой производительности, теперь также сможет комфортно пользоваться сайтом.

2.3 Составные части и построение сайта

Новая версия сайта содержит следующие разделы:

- История
- Направления деятельности
- Услуги
- Порядок доступа
- Оборудование ЦКП
- Научные методики
- Пользователи
- Результаты
- Международное сотрудничество
- Кадры

В разделе «История» представлена информация об истории создания Центра, отображены основные этапы развития. В разделе «Направления деятельности», в соответствии с Уставом Центра коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур» сформулированы основные цели и задачи ЦКП, отображены основные научные направления ЦКП.

В разделе «Услуги» сайта ЦКП представлено описание основных услуг, оказываемых Центром. Все услуги структурированы и объединены в группы по методам исследования, что позволяет посетителю сайта быстро сориентироваться и найти интересующую его информацию. Эскиз раздела «Услуги» приведен на Рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 Эскиз раздела «Услуги» сайта ЦКП ИФМ РАН.

В разделе «Порядок доступа» сайта ЦКП имеются подробные разъяснения, каким образом осуществляется прием от заинтересованных пользователей заявок на проведение научных исследований и оказание услуг. В разделе размещен образец заявки, в удобном формате MS Word, который доступен для скачивания и последующего заполнения заинтересованным пользователем. Для оперативной обработки заполненных заявок в разделе указан адрес электронной почты, на который данный документ следует высылать. Форма заявки на оказание услуг ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур» приведена на Рисунке 2.4.

ЗАЯВКА	
НА ОКАЗАНИЕ УСЛУГ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ОБРАЗЦОВ	
в ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур»	
СВЕДЕНИЯ О ЗАЯВИТЕЛЕ	
Наименование организации заказчика	
Информация об исследовании	
1. Описание объектов исследования	
2. Задачи исследования	
3. Оборудование, на котором возможно проведения исследования	
Контактная информация	
1. Контактное лицо (ФИО, должность)	
2. Электронный адрес	
4. Телефон	

Рисунок 2.4 Форма заявки на оказание услуг ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур»

По сравнению с первым сайтом Центра, раздел «Оборудование ЦКП» претерпел наибольшее количество изменений. По каждой позиции оборудования ЦКП добавлено подробное описание, позволяющее судить о возможностях и уникальных свойствах того или иного прибора или установки. Все описания снабжены высококачественными полноцветными фотографиями, что делает работу с разделами более приятной для пользователя. Описание каждого прибора снабжено подразделом «КОНТАКТНОЕ ЛИЦО» с указанием контактных данных исследователя, непосредственно работающего с данным прибором, что позволяет потенциальному пользователю заранее связываться с исполнителем, и уточнять конкретные подробности, относящиеся к предстоящему исследованию. Эскиз раздела «Оборудование ЦКП» с примером развернутого описания приведен на Рисунке 2.5.

Следующим новым разделом на сайте Центра является раздел «Научные методики». В данном разделе приведен перечень научных методик исследования различных физических и технических характеристик и параметров, находящихся в распоряжении Центра коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур».

Раздел «Пользователи» так же является новым и содержит информацию об основных пользователях ЦКП. Кроме того, в разделе предусмотрен прямой переход непосредственно на сайт каждого из пользователей услугами Центра с целью получения дополнительной информации о сфере деятельности последних. Эскиз раздела «Пользователи» представлен на Рисунке 2.6.

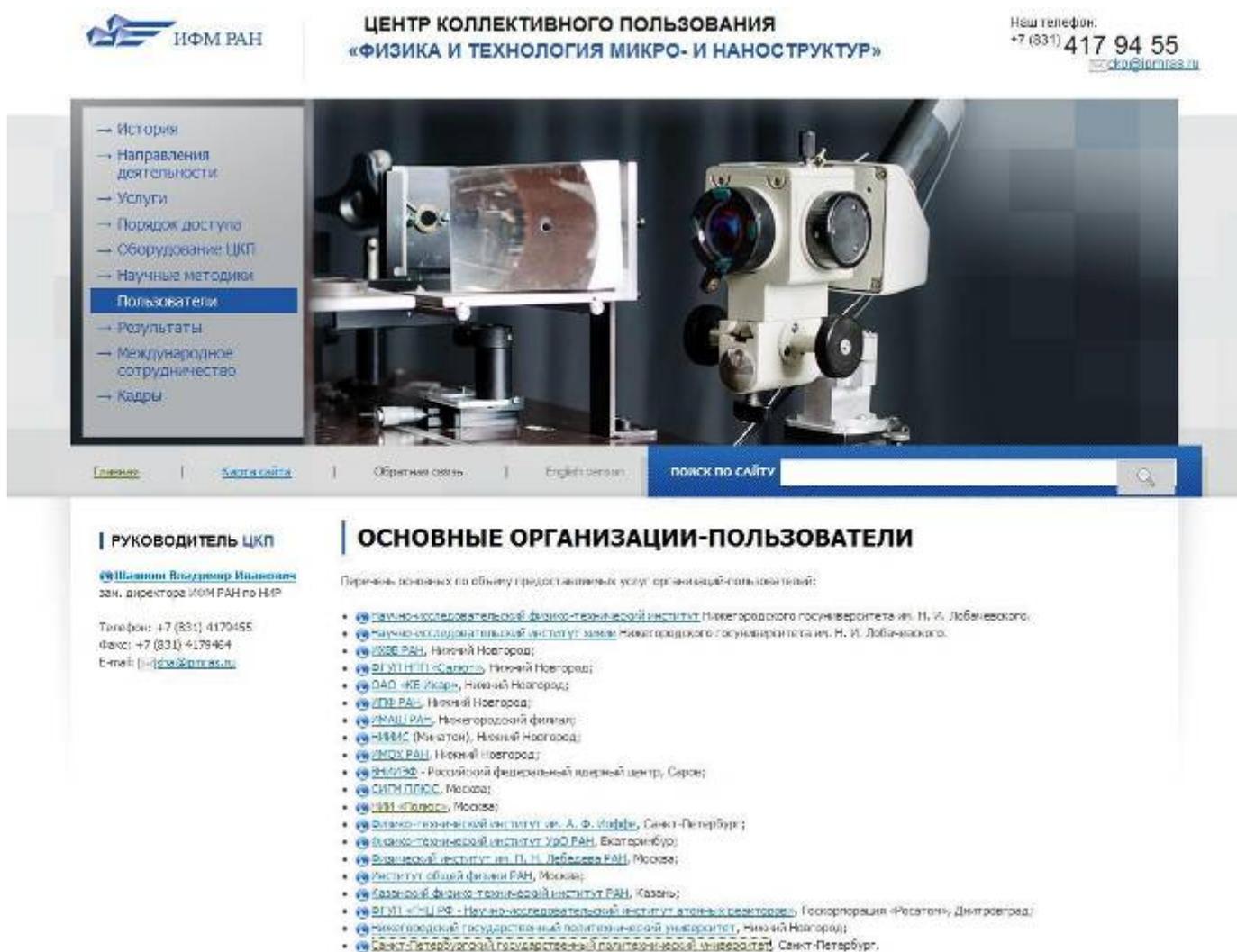


Рисунок 2.6 Эскиз раздела «Пользователи»

Раздел «Научные результаты» (рисунок 2.7) содержит информацию о наиболее существенных результатах и достижениях за последние годы. Раздел содержит краткое описание каждого результата, а так же список авторов, данный результат получивших. Кроме того, раздел «Научные результаты» содержит 2 подраздела – «Публикации» и «Участие в конференциях».

Подраздел «Публикации» содержит библиографические данные работ, опубликованных коллективом Центра, структурированные по году выхода работы. Подраздел «Участие в конференциях» соответственно содержит информацию о выступлениях представителей ЦКП на российских и международных конференциях, равно как и информацию о наградах, присуждаемых коллективу ЦКП. В дальнейшем планируется расширить раздел добавлением подраздела «Патенты», ввиду активной патентной работы, проводимой в ЦКП.



Рисунок 2.7 Эскиз раздела «Научные результаты»

В связи с расширением международного сотрудничества Центра, на новом сайте ЦКП был создан раздел «Международное сотрудничество», в котором представлена информация о выполнении международных проектов.

В Центре коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур» Постоянно ведется работа по подготовке новых научных и научно - производственных кадров,

равно как и по повышению квалификации существующего кадрового состава. Информация о работе с кадрами представлена в разделе «Кадры» (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 Эскиз раздела «Кадры»

В разделе указан количественный состав работников ЦКП, их квалификация, присутствует информация о повышении квалификации в виде указания количества защищенных докторских и кандидатских диссертаций за последний период. Перечислены подразделения учебных заведений, в которых сотрудники ЦКП читают лекционные курсы и ведут лабораторные работы специального практикума. Кроме того, в разделе присутствуют гиперссылки на сайты кафедр Нижегородского госуниверситета им. Н. И. Лобачевского, на которых данные курсы лекций и практикумы проводятся.

Работа по непосредственной подготовке кадров отображена в подразделе «Подготовка» раздела «Кадры». В данном подразделе приведен перечень студентов, выполнивших дипломные работы за последний год в ЦКП и защитившие их. Указаны темы дипломных работ.

В дальнейшем планируется так же уделять внимание усовершенствованию сайта Центра коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур», расширению и дополнению информации в разделах сайта. Так, помимо уже упомянутых выше планов по созданию подраздела «Патенты» раздела «Научные результаты», планируется заметно расширить раздел «Методики», показать в разделе примеры измерений с применением различных методик, привести примеры полученных результатов. Ввиду расширения рынка мобильных интернет устройств, таких как планшетные компьютеры и смартфоны, в будущем планируется адаптировать программный код сайта так, чтобы воспроизведение сайта на данном типе устройств было адекватным, и позволяло пользователям комфортно пользоваться сайтом.

3 ОЦЕНКА РЫНОЧНОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1 Оценка рыночного потенциала новых видов услуг ЦКП ИФМ РАН

Центр коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур» (ЦКП ИФМ РАН) накопил большой набор дорогостоящего аналитического и технологического оборудования, освоил большое количество методик измерений, имеет квалифицированный персонал. Такие приборы как время-пролетный масс-спектрометр TOF.SIMS-5, дифрактометр Bruker D8 Discover, электронные микроскопы являются уникальными по возможностям приборами с широким спектром приложения к разнообразным задачам материаловедения. В то же время, их высокая стоимость (например, TOF.SIMS-5 - 52 млн. руб.) не позволяет закупить этот прибор организациям региона. В этом смысле услуги ЦКП ИФМ РАН имеют высокий рыночный потенциал. Однако анализ реальных заказов на исследования в ЦКП ИФМ РАН от промышленных предприятий и организаций региона показывает, что рынок сильно ограничен.

Видны две основные причины. Первая, которую можно было бы предположить – высокая стоимость услуг, и как следствие низкий платежеспособный спрос. Понимая это, руководство ЦКП ИФМ РАН идет на выполнение разовых услуг бесплатно, по письму о научно-техническом содействии, считая, что они носят рекламный характер. Расчет состоит в том, что после этого работы будут продолжены на договорной основе. К сожалению, эти расчеты очень редко оправдываются. За этим стоит более глубокая причина: предприятий, разрабатывающих высокие технологии очень мало. Более того, за последние несколько лет их число не увеличивается. Этот факт снижает оптимистическую оценку рыночного потенциала услуг ЦКП, однако более широкий взгляд на работу ЦКП ИФМ РАН показывает иную картину.

Кроме услуг сторонним организациям выполняется большой объем работ в рамках НИР головной организации – ИФМ РАН. Сюда относятся практически все экспериментальные работы ИФМ РАН в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 - 2013 годы», в рамках ФЦП «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники на 2008-2015 годы», работы по грантам Президента Российской Федерации, по грантам Российского фонда фундаментальных исследований, работы по Программам Российской Академии наук. В Таблице 3.1 приведен для справки список госконтрактов, выполняемых в ИФМ РАН в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

Таблица 3.1 Госконтракты, выполняемые в 2012 году в ИФМ РАН в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» с использованием оборудования ЦКП

№	Номер госконтракта	Название темы
1.	ГК № П805	«Исследование полупроводниковых гетероструктур с квантовыми ямами методами терагерцовой спектроскопии»
2.	ГК № 14.740.11.0337	«Волоконно-оптические системы (датчики) для измерения различных физических параметров»
3.	ГК № 16.740.11.0271	«Новый метод и аппаратура для оптического мониторинга технологических параметров при формировании пленочных наноструктур»
4.	ГК № 16.740.11.0321	«Узкозонные гетероструктуры с квантовыми ямами на основе соединений HgTe/CdTe»,
5.	ГК № 16.740.11.0376	«Разработка методов аттестации и изготовления прецизионной оптики для систем сверхвысокого пространственного разрешения»
6.	ГК № 14.740.11.1134	«Развитие новых методов и средств прецизионной спектроскопии ТГц частотного диапазона с использованием квантовых каскадных лазеров»
7.	ГК № 14.740.11.0889	«Генераторы терагерцового излучения на массивах джозефсоновских контактов»
8.	ГК № 14.740.11.1156	«Транспортные свойства низкоразмерных наноструктурированных сверхпроводящих систем в пространственно неоднородных магнитных полях»

Таблица 3.1 показывает, что выполняются экспериментальные работы, где большой объем занимают измерения на оборудовании ЦКП ИФМ РАН. Это же относится к работам по грантам Президента Российской Федерации и грантам Российского фонда фундаментальных исследований, которых выполняется более 70 в 2012 году. Кроме этих работ в ИФМ РАН выполняется более 40 тем по программам РАН. Объем этих работ несоизмеримо больше, чем заказы сторонних организаций. Эти научно-исследовательские работы создают задел для высоких технологий в России завтрашнего дня, что заставляет по-другому оценивать и рыночный потенциал услуг ЦКП. Следует особо отметить взаимовыгодный характер связей ЦКП с головным институтом. Сотрудники института выполняют большой объем на оборудовании ЦКП, но в промежутках между госконтрактами по поддержке ЦКП Центр не может существовать без поддержки института. В настоящее время это сложившаяся форма, доказавшая свою жизнеспособность, и, видимо, дальнейшее развитие ЦКП ИФМ РАН будет проходить в рамках этой формы. Одно из свидетельств этому – ЦКП ИФМ РАН получил в 2012 году статус структурного подразделения Института физики микроструктур.

3.2 Оценка рыночного потенциала результатов НИР по созданию диодов с пониженной высотой барьера и систем миллиметрового видения

Проект был направлен на решение проблемы получения изображений объектов в миллиметровом диапазоне длин волн в реальном масштабе времени на базе высокочувствительных планарных детекторов, созданных методами эпитаксиальных технологий. Работы в этом направлении проводятся в ЦКП ИФМ РАН уже несколько лет. Основы этих работ были заложены в докторской диссертации Шашкина В.И. [1].

Судя по литературным данным, военные применения систем миллиметрового видения – это видение в условиях сильного задымления, наличия пыли, дождя и тумана, когда инфракрасные системы видения неэффективны. Гражданские применения – это, прежде всего, антитеррористическая деятельность: обнаружение оружия и взрывчатых веществ под одеждой и в багаже в аэропортах и др. общественных местах, проверка писем и почтовых отправлений и др. Научные задачи есть в диагностике плазмы, спектроскопии и других областях.

Масштабные исследования в области миллиметровых и субмиллиметровых длин волн проводятся уже более 30 лет. Традиционная область гражданского применения (астрономия, диагностика плазмы, спектроскопия) за последнее время существенно расширилась за счет того, что развились новые технологии (например, фемтосекундная оптоэлектроника), появились приоритетные прикладные задачи (например, противодействие терроризму, диагностика в медицине). Большинство из задач гражданского применения требуют устройств, которые могут регистрировать сигнал на расстоянии единиц-десятков метров от источника излучения. Для таких систем могут применяться детекторные приёмники на диодах с барьером Шоттки. Они являются наиболее распространенными нелинейными, чувствительными элементами. Диоды с барьером Шоттки широко используются в смесителях и умножителях частоты суб- и терагерцового диапазонов частот. Существенно реже диоды с барьером Шоттки применяют на этих частотах в малосигнальном режиме как квадратичные и видео- детекторы. Вместе с тем, интерес к этим применениям вызван необходимостью построения систем радиовидения и приёма широкополосных терагерцовых сигналов [2]. Решение задачи предполагает построение многоэлементных матричных приёмников, расположенных в фокальной плоскости антенной системы.

Для обеспечения высокой чувствительности при детектировании нужно уменьшать эффективную высоту барьера Шоттки и не использовать постоянное смещение. Это упрощает конструкцию детектора и приводит к снижению уровня шумов ($1/f$ и др.) из-за отсутствия постоянного тока смещения. Для детектирования без постоянного смещения в миллиметровом диапазоне длин волн используются низкобарьерные диоды с сильным легированием приповерхностной области полупроводника [3], диоды с объёмным барьером [4, 5] и туннельные

диоды [6, 7]. Недавно были предложены для этой цели гетероструктуры полуметалл-полупроводник ErAs/GaAs [8]. В большей части, исследования чувствительности низкобарьерных диодов проводились в зауженных волноводах или в копланарных линиях. Известно сравнительно мало исследований чувствительности детекторов на основе антенн с непосредственным включением диодов [7, 9]. При монтаже в антенны трудно судить о полной компенсации реактивной составляющей импеданса диода, поскольку полное описание антенн и приемных трактов отсутствует. В последнее время появились работы, в которых согласующие элементы в микрополосковом исполнении и детекторные диоды выполнены на единой подложке GaAs [10]. Существующая теория антенн на толстых диэлектриках с высокой диэлектрической проницаемостью указывает, что эффективность известных простых антенн на GaAs должна быть низкой. Для увеличения эффективности детекторов над подложкой GaAs с антенной встраивают дополнительные линзы [10]. Иногда подложку GaAs помещают в волновод и применяют дополнительную рупорную антенну, добиваясь в результате высоких значений чувствительности в трёхмиллиметровом диапазоне длин волн [10]. Следует признать, что все перечисленные конструкции являются многокомпонентными и достаточно сложными. В матричном исполнении 2×2 , при плотной компоновке была опробована только конструкция с рупорами [10].

Около 10 лет назад за рубежом начались активные исследования по получению изображений в миллиметровом диапазоне длин волн в реальном масштабе времени (более 10 кадров в секунду). Если в поисковой системе интернета набрать “millimeter-wave imaging”, то будет обнаружено более 50000 документов. Из них следует, что исследования по миллиметровому видению с использованием матричных приёмников в фокальной плоскости (как в цифровой видеокамере) проводятся в основном в США и Великобритании. Поиск по той же теме в русскоязычном интернете даёт несколько ссылок на работы по системам механического сканирования с одним приёмным каналом, что не имеет отношения к заявленной теме. Таким образом, за рубежом более 10 лет ведутся работы по миллиметровому видению для военных и гражданских применений. Исследования по системам видения миллиметрового диапазона проводят государственные и частные лаборатории США - Air Force Research Laboratory, Lockheed Martin Aeronautics Company, Northrop Grumman Space Technology, фирмы HRL Laboratories (принадлежит Boeing, General Motors, Raytheon), Trex Enterprises, Millivision и др. В Великобритании – Farran Technologies (принадлежит Smiths Group), QunetiQ, ThruVision (дочерняя компания Rutherford Appleton Laboratory), TeraVeiw (дочерняя компания Toshiba Research Europe’s Laboratories) и др. Примером наиболее успешной разработки являются камеры миллиметрового видения, построенные HRL совместно с Trex. Основа камеры – многоэлементная решетка фокальной плоскости. Рабочая частота – 94 ГГц, поле зрения - $20^\circ \times 30^\circ$, размерность 192×128 элементов (более 25000 детекторов), частота кадров до 30 в секунду. Каждый детектор представляет собой туннельный диод, в котором

обеспечивается чувствительное детектирование сигналов без постоянного смещения. Есть несколько разновидностей камеры (для вертолѐта, для контроля оружия под одеждой и др.). Стоимость изготовленных камер составляет около 1 000 000 \$, разработчики надеются снизить цену до 200 000 \$. В камере используются последние достижения нанотехнологии (гетероструктура детекторного диода), миллиметровой микроэлектроники (антенная решѐтка) и компьютерной обработки сигналов (получение сверхразрешения).

Видно, что рынок устройств миллиметрового видения существует, он постепенно расширяется из области специальных приложений в область широкого использования. Однако, говоря о результатах уровня НИР, к которым относится и настоящее исследование, следует иметь в виду, что это лишь первый этап разработки, на котором доказывается принципиальная возможность создания устройства. Далее должна следовать более дорогостоящая ОКР-овская работа по разработке технологии, после которой возможен переход к производству, если себестоимость устройства окажется ниже, чем у конкурентов, или, если в стране ставится задача своими силами производить такие устройства. Полученные в ходе выполнения настоящего госконтракта результаты интеллектуальной деятельности были оформлены в виде двух заявок на патенты. В настоящее время эти заявки приняты и идет их рассмотрение. После их получения патенты будут иметь определенный рыночный потенциал.

4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ, В ТОМ ЧИСЛЕ В РЕАЛЬНОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ, А ТАКЖЕ В ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И РАЗРАБОТКАХ

В настоящем разделе обсуждаются перспективы использования результатов настоящего госконтракта, включая закупленное оборудование ЦКП ИФМ РАН (основной объем расходов по теме), подраздел 4.1, разработанные методики, подраздел 4.2, и результаты исследований по применению низкобарьерных полупроводниковых диодов в системах миллиметрового видения, подраздел 4.3.

4.1 Использование нового спецоборудования ЦКП ИФМ РАН в реальном секторе экономики, а также в дальнейших исследованиях и разработках

Приобретенное в рамках настоящего госконтракта спецоборудование – это современные приборы, отвечающие высоким требованиям инновационных разработок, выполняемых в промышленных и научных организациях. Подробное рассмотрение особенностей приборов позволяет выработать рекомендации по их использованию.

4.1.1 Рентгеновский дифрактометр D8 Discover фирмы Bruker обеспечивает возможность рентгенодифракционного исследования следующих видов материалов:

- эпитаксиальные многослойные структуры;
- текстурированные материалы;
- поликристаллические материалы;
- покрытия и приповерхностные слои, в том числе аморфные.

Благодаря легкой перестройке рентгенооптической схемы прибор позволяет быстро переходить от одного типа образцов к другому без процедур доюстировки элементов.

Для этого прибор укомплектован следующим программным обеспечением:

- анализ эпитаксиальных структур по спектрам высокого разрешения;
- построение полюсной фигуры для анализа текстур;
- рентгенофазовый анализ с использованием базы порошковых данных PDF2;
- анализ покрытий и поверхностных слоев по данным рефлектометрии.

На РД- оборудовании в ЦКП ИФМ РАН в настоящее время выполняется анализ структур, выращенных в реакторах молекулярно-пучковой, газофазной эпитаксии, лазерного и магнетронного напыления, несколько сот образцов в год с 10 реакторов ИФМ РАН, НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, ИХВВ РАН, ИПФ РАН, ряда предприятий города Нижнего Новгорода, а также отдельные серии образцов из других городов и других стран. Типы структур весьма разнообразны: сверхрешетки и структуры с квантовыми ямами и квантовыми точками на основе полупроводниковых твердых растворов GeSi, AlGaAs, InGaAs, InGaP, AlGaN для диодных, транзисторных, лазерных и микромеханических приложений; слои высокотемпературных

сверхпроводников YBCO для высокочастотных резонаторов и стандартов напряжений; разнообразные монокристаллические подложки и буферные слои. По данным РД от тестовых образцов производится калибровка потоков в реакторах эпитаксиального роста, с чем связано требование оперативности исследований. Ориентируясь на эти потребности, прибор и закупался. В планы по его использованию входит разработка новых видов услуг, выполнение НИР по методике рентгенодифракционных исследований и выполнение широкого круга исследований, в том числе для сторонних организаций. Наиболее эффективным является использование прибора в сложных исследованиях (сверхрешетки и структуры с квантовыми ямами и квантовыми точками на основе полупроводниковых твердых растворов), поскольку более простые виды анализов, например, фазовый анализ порошков, могут быть выполнены и на более простых установках.

4.1.2 Профилометр модели 130 (внеплазменный контроль в составе высоковакуумной установки СММ-2000) предназначен для измерений параметров профиля и параметров шероховатости поверхности по системе средней линии (ГОСТ 25142-82), с разделением «волнистости» и «шероховатости» по ГОСТ 2789-73. Прибор внесен в Государственный реестр средств измерения, регистрационный № 33319-06. Область применения – метрологические центры, лаборатории научно-исследовательских и учебных институтов, лаборатории и центры экспертизы и контроля, предприятия машиностроительной, автомобильной, подшипниковой и других отраслей промышленности. Действие профилометра основано на принципе ощупывания неровностей измеряемой поверхности щупом (алмазной иглой) в процессе перемещения вдоль измеряемой поверхности и последующего преобразования возникающих при этом вертикальных перемещений щупа в цифровой сигнал. Щуп встроен в блок датчика, который при сканировании ползет по поверхности образца своей опорой. Поэтому измерение профиля идет относительно опоры, представляющей собой твердосплавный полированный сегмент диска, неподвижно закрепленный на датчике. В ЦКП ИФМ РАН прибор используется в комплекте с оптической измерительной системой Talysurf CCI 2000, где измерения высот точек поверхности выполняются по интерференционной картине. Измерения на Talysurf CCI 2000 становятся некорректными в случае прозрачных покрытий, когда отражение от внутренних границ сильнее, чем от границы с воздухом. Контактный профилометр модели 130 дает в этих случаях возможность измерить высоту ступенек на поверхности. Кроме того, надежность прибора позволяет использовать его персоналу с невысокой квалификацией. С учетом этой особенности подготовлена лабораторная работа для студентов ННГУ им. Н.И. Лобачевского по измерению параметров шероховатости с использованием профилометра модели 130.

Наиболее эффективным является использование прибора в случае прозрачных покрытий в дополнение к оптическому профилометру.

4.1.3 Генератор сигналов серии PSG компании Agilent Technologies E8257D-550 (от 250 кГц до 50 ГГц). Ввод прибора в эксплуатацию описан в п. 1.2 настоящего отчета. Прибор может быть эффективно использован в научно-исследовательских работах, для осуществления которых требуется генератор сигналов синтезаторного типа с высокой стабильностью частоты в диапазоне до 50 ГГц и выходной мощностью выше 10 мВт. В частности, это работы:

- исследование умножителей частоты на полупроводниковых сверхрешетках. В зависимости от мощности входного сигнала, которая должна быть более 5 мВт, и частоты сигнала измеряется мощность гармоник в терагерцовом диапазоне;
- спектрометрические исследования внутримолекулярных энергетических переходов, гигагерцового и терагерцового диапазонов частот. Для стабилизации частоты сигнала возбуждающего излучения применяются опорные синтезаторы диапазона до 50 ГГц. Такие же синтезаторы применяются в качестве гетеродина супергетеродинного спектрометра с гармоническим смесителем;
- подавление помех в измерительной аппаратуре с помощью фильтров с динамическим диапазоном более 100дБ. Для измерения АЧХ и настройки таких фильтров требуются генераторы с высокой стабильностью частоты и большой мощностью выходного сигнала.

4.1.4 Атомно-силовой микроскоп Ntegra Prima. Ввод прибора в эксплуатацию описан в п. 1.4 настоящего отчета. Как уже отмечалось, основное предназначение этого прибора в ЦКП ИФМ РАН - аттестация дефектов формы сверхгладких (шероховатость субнанометрового уровня) поверхностей в широком диапазоне пространственных частот. Это важная часть целого ряда задач современной коротковолновой оптики, где требования на допустимые дефекты (шероховатости) поверхности составляют 3-5 ангстрема в диапазоне пространственных частот $10^{-6} - 10^3$ мкм⁻¹ (диапазон латеральных размеров от метра до 1 нм). Прибор имеет более 40 измерительных методик, включая уникальные, см. п. 1.4, однако в ряду приборов зондовой микроскопии ЦКП ИФМ РАН он имеет специфические особенности: оснащен уникальным модулем виброзащиты, состоящим из системы подвесов, позволяющих уменьшить влияние внешних воздействий в процессе измерений; есть в наличии оптический микроскоп, который позволяет сделать точное позиционирование по кадру; латеральный размер измеряемых кадров до 100 мкм; благодаря программе сшивки кадров, удается увеличить размеры измеряемых кадров до 200-250 мкм. Это позволяет рекомендовать его для измерения шероховатостей в коротковолновом и средневолновом диапазоне в качестве основной области приложений.

4.1.5 Технологическое оборудование, закупленное в рамках настоящего госконтракта. К такому оборудованию относятся установки для нанесения слоев и контактов, литографические установки, криогенное оборудование и вспомогательное оборудование.

Важным этапом изготовления лабораторных образцов нано- и микроструктур является хорошо воспроизводимое осаждение тонких и ультра-тонких слоёв различных материалов, позволяющее сформировать надежные электрические контакты, а так же диэлектрические, полупроводниковые и металлические пленки высокого структурного качества. Обычно в процессе изготовления образцов требуется использование нескольких различных методов осаждения функциональных материалов, которые зачастую реализованы в разных технологических установках. Преимущество приобретенной в рамках настоящей работы установки физического осаждения в вакууме Amod 206 производства компании Angstrom Engineering состоит в том, что в ней одновременно реализованы методы резистивного термического испарения и испарения электронным лучом. Установка имеет достаточно большую 20-ти дюймовую кубическую рабочую камеру, что снимает ограничения на размер пластин.

Анализ работы ЦКП ИФМ РАН за последние годы показал недостаточное приборное обеспечение контроля процессов формирования многослойных наноструктур (Si, GaAs, GaN и других) *in situ*, непосредственно в реакторах напыления без вынесения на воздух, в вакуумном объеме реактора. Во многих случаях такие исследования дают уникальную информацию, без которой невозможна отработка процессов нанесения слоев, и которую невозможно получить на образцах, извлеченных из реактора на воздух, где происходит быстрая деградация поверхностных слоев. Вторая, и очень важная для развития ЦКП область, в которой наметилось явное отставание, - это метрологическое обеспечение приборов, методик и контрольных образцов. С целью преодоления этих недостатков, тормозящих развитие ЦКП ИФМ РАН, было решено приобрести "Установку исследования многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур методами микроскопии в процессе плазменного напыления-перепыления с контролем шероховатости и качества их поверхности", СММ-2000, отечественного производства, которая имела бы высокий уровень метрологического обеспечения: метрологически поверенные приборы с сертификатом средства измерения, аттестованные методики и контрольные образцы. Установка предназначена для исследования методами микроскопии нанометрового разрешения процессов формирования или модификации поверхности многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур непосредственно в динамике создаваемого в этой установке процесса их плазменного напыления или перепыления, в том числе с контролем шероховатости и качества их поверхности как внутри, так и вне плазмы установки. Сюда относится, в частности, профилометр модели 130 предназначенный для измерений параметров профиля и параметров шероховатости поверхности. Кроме того, аттестованные образцы из комплекта поставки установки будут использованы при аттестации методик измерения на других, уже имеющихся измерительных приборах ЦКП ИФМ РАН, что обеспечит существенное продвижение ЦКП в его метрологическом обеспечении.

Одним из важнейших этапов формирования лабораторных образцов микро- и наноструктур является фотолитография. Наиболее универсальными по применению на сегодняшний день остаются фотолитографические установки. Новая центрифуга для нанесения фоторезиста модели SPIN-1200D производства фирмы MIDAS System Co., Ltd. (Корея) в комплекте с держателями пластин предназначена для нанесения фоторезиста в лабораторных условиях ЦКП ИФМ РАН в составе литографической установки. Центрифуга необходима для равномерного, точного и воспроизводимого нанесения слоя фоторезиста на ложки большого размера, диаметром до 4 дюймов, а также на куски подложек. Центрифуга, по сравнению с существующей, кроме большего диаметра пластин обеспечивает более равномерное точное и воспроизводимое нанесение фоторезиста и минимизацию размеров валика фоторезиста по краю образца не только на круглых подложках, но и на кусочках пластин, что очень важно для лабораторной технологии. Уменьшение толщины валика фоторезиста по краю образца позволит получить лучший оптический контакт с фотошаблоном и достигнуть разрешения 1 мкм. Этот параметр принципиально важен для диодов с размерами до нескольких микрометров.

В то же время, нужна фотолитография, ориентированная на создание единичных образцов наноструктур. Требования к такой установке: возможность формировать любые изображения в фоторезисте с минимальными размерами до 1 мкм без использования фотошаблонов, формируя рисунок графическими средствами компьютера; автоматическое послойное совмещение; возможность формирования 3D структур; работа с образцами и кусками пластин нестандартных размеров и неправильной формы; компактность. Была приобретена удовлетворяющая этим требованиям установка бесконтактной лазерной литографии μ PG101 (лазерный генератор изображения) компании Heidelberg (Германия).

В Центре коллективного пользования активно ведутся экспериментальные исследования полупроводниковых, металлических и сверхпроводящих гетеро- и наноструктур в широком интервале температур и при наличии сильных магнитных полей. Такие исследования часто требуют использования современных криостатов, охлаждаемых жидким гелием. Спектр криогенного оборудования в ЦКП ИФМ РАН достаточно широкий, количество различных криогенных установок постоянно растет, что обеспечивает возможность проводить исследования при экстремальных условиях (в сверхнизких температурах и при сильных магнитных полях) на мировом уровне. Приобретение ЦКП ИФМ РАН гелиевого ожижителя Cryomech LHeP18 с системой сбора газообразного гелия позволило заметно снизить потери гелия при проведении низкотемпературных исследований, доведя рециркуляцию использования газа до трех раз, в то время как до приобретения установки ожижения и ввода в эксплуатацию системы сбора потери доходили до 100%. Кроме того, наличие собственной системы ожижения позволило избавиться от

необходимости для исследователей составлять график проведения экспериментов в соответствии с графиком работы внешних организаций, производящих жидкий гелий.

Вспомогательное оборудование и комплектующие. Кроме закупки нового оборудования ЦКП ИФМ РАН постоянно проводит работу по поддержанию работоспособности эксплуатируемого оборудования, закупкам необходимых материалов и вспомогательного оборудования.

Для обеспечения бесперебойной работы в ЦКП ИФМ РАН нового просвечивающего электронного микроскопа LIBRA 200, ввод которого в эксплуатацию намечен на 2012 г., была необходима компактная трехфазная система защиты электропитания с масштабируемым временем автономной работы, минимальной резервируемой мощностью 24 кВт, On-Line типа, с масштабируемой системой батарей, обеспечивающей возможность горячей замены отдельных модулей. Была приобретена удовлетворяющая этим требованиям модель Smart-UPS VT 30kVA, производитель: APC, что повысит надежность работы и долговечность эксплуатации дорогостоящего универсального микроскопа LIBRA 200.

При выполнении настоящего госконтракта была использована установка молекулярно-лучевой эпитаксии для создания низкобарьерных диодов на основе структур Si/Ge. Планируется, что в распоряжение ЦКП ИФМ РАН поступит молекулярно-лучевая установка для выращивания совершенных слоев полупроводниковых нитридов. Возникла необходимость докомплектации установки несколькими позициями: газовая линия подачи чистого азота в плазменный источник установки МЛЭ; стартовый комплект материалов для проведения работ по технологическому запуску установки МЛЭ; молекулярный источник для установки молекулярно-лучевой эпитаксии.

4.2 Использование новых методик и новых видов услуг ЦКП ИФМ РАН

В рамках настоящей НИР выполнен большой объем работ по совершенствованию методов анализа с использованием оборудования ЦКП. Новые методики и виды услуг появляются в ходе освоения возможностей нового оборудования, например, дифрактометра Bruker D8 Discover, и в ходе расширения возможностей старого, ранее закупленного оборудования, например, вторично-ионного масс-спектрометра TOF.SIMS-5, поскольку приборы такого уровня сложности имеют большой запас по развитию аналитических методик.

Методика использования комплексных ионов Ge_2^- , Cs_2Ge^+ при ВИМС-анализе слоев GeSi позволила в значительной степени преодолеть влияние матричных эффектов и повысить точность анализа концентрации твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ на масс-спектрометре TOF.SIMS-5.

Методика количественного безэталонового анализа концентрации изотопов $^{28,29,30}\text{Si}$ в кремнии методом ВИМС на установке TOF.SIMS-5 стала необходимым инструментом анализа изотопно-обогащенных слоев кремния, поскольку дает возможность послойного анализа.

Методика нормировки по глубине профилей состава слоев, зарегистрированных методом вторично-ионной масс-спектрометрии, с использованием оптической измерительной системы Talysurf CCI-2000 позволила нормировать профиль ВИМС по глубине с точностью 1% на глубине 5 мкм.

Методика оценки параметров структуры, изготовленных на основе эффекта приповерхностного дельта-легирования, из обработки температурных зависимостей экспериментальных вольт-амперных характеристик стала важным инструментом анализа низкобарьерных диодов. Она создана благодаря разработанной теории переноса носителей через модифицированный барьер металл-полупроводник. Полученные данные анализов позволяют уточнить ростовые параметры процессов для получения оптимальных, с точки зрения детекторных характеристик, микроволновых диодов, применяемых в матричных системах радиовидения.

Методика анализа концентрации твердых растворов (Al,Ga)As методами вторично-ионной масс-спектрометрии и рентгеновской дифрактометрии содержит в себе два результата, важных для анализа структур на основе (Al,Ga)As. Методика рентгеновского анализа была доработана, она учитывает остаточные упругие напряжения в слое и обеспечивает точность 2%, и совместима с действующими алгоритмами расчета спектров рентгеновской дифракции по динамической теории рассеяния. В результате совместного анализа серии тестовых образцов показано, что при использовании в масс-спектрометре TOF.SIMS 5 распыляющих ионов Cs^+ и анализирующего пучка Bi^+ , близкой к линейной является зависимость $Y(\text{CsAl}^+)/Y(\text{CsAs}^+)$ от $x(\text{AlAs})$ в положительной моде анализируемых ионов и $Y(\text{AlAs}^-)/Y(\text{As}^-)$ от $x(\text{AlAs})$ в отрицательной моде. Методика введена в использование и будет применяться в работах ЦКП ИФМ РАН.

Методика восстановления профилей послойного ВИМС-анализа реализована с учетом физических особенностей послойного анализа ионным распылением. Сдвиг экспериментального профиля при восстановлении определяется путем совместного решения прямой и обратной задач послойного анализа, что не требует дополнительных измерений. Разработанный алгоритм протестирован как на смоделированных, так и на экспериментальных профилях. Было показано, что предложенный подход позволяет повысить информативность послойного анализа и разрешение метода по глубине, что позволяет рекомендовать его для использования.

Разработанные методики после тщательной их проверки служат основой для включения новых видов услуг ЦКП ИФМ РАН. В ходе выполнения НИР в Перечень дополнительно введено несколько новых услуг, среди которых:

- «Послойный анализ гетеросистем GeSi/Si методом вторично-ионной масс-спектрометрии на приборе TOF.SIMS-5» с использованием методики калибровки концентрации матричных элементов.

- «Послойный анализ гетеросистем AlGaAs/GaAs методом вторично-ионной масс-спектрометрии на приборе TOF.SIMS-5» с использованием методики калибровки концентрации матричных элементов.
- «Рентгенофазовый анализ поликристаллических образцов» с использованием дифрактометра Bruker D8 Discover и базы данных PDF-2.

В Приложении Г приведен обновленный Перечень услуг ЦКП ИФМ РАН. Это большой набор аналитических исследований, которые можно рекомендовать научным и промышленным организациям, занимающимся инновационными разработками в области нанотехнологий. В таком качестве Перечень и приведен на сайте ЦКП ИФМ РАН.

4.3 Рекомендации по использованию результатов, полученных по исследованию низкобарьерных диодов на основе структур с дельта-слоями

Основные результаты состоят в следующем: последовательно были решены теоретические вопросы задачи о движении носителей заряда в низкобарьерном диоде Мотта, отработана лабораторная технология металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ), обеспечивающая формирование низкобарьерных контактов металл-полупроводник, и формирования планарных диодов на основе низкобарьерных контактов.

В исследованиях использована предложенная ранее [1] оригинальная схема метода Монте-Карло, которая позволяет моделировать одновременно как процессы, происходящие в объеме полупроводника, так и контактные явления. Расчет, сделанный методом Монте-Карло, демонстрирует хорошее совпадение с экспериментом при всех напряжениях, при которых потенциальную яму в i слое вблизи туннельного барьера можно считать классической. Особенностью опробованной в настоящем проекте лабораторной технологии металлоорганической газофазной эпитаксии, обеспечивающей формирование низкобарьерных контактов металл-полупроводник, является непрерывный процесс внутри одного реактора. Легированный кремнием тонкий δ -слой и верхний слой металла (алюминий) наносятся в реакторе металлоорганической газофазной эпитаксии за счет подачи газов-источников и их разложения над нагретой подложкой. Отличительной особенностью технологии изготовления планарных диодов является использование несущей плёнки полиимида, обеспечивающего механическую прочность и низкие значения паразитной емкости. Это обеспечивает создание работоспособных диодов, пригодных для проверки заложенных идей, поэтому и в дальнейших исследованиях методика будет использована в качестве базовой. По результатам опубликованы работы в периодической литературе и сделаны доклады на научных конференциях, что дает возможность другим исследовательским группам использовать полученные результаты.

5 ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ И АКТОВ ЗАКАЗЧИКА

В Техническом задании и Календарном плане на этапе 4 «Обобщение и оценка результатов исследований» было предусмотрено выполнение следующих работ:

1. Поставка спецоборудования и проведение пуско-наладочных работ.
2. Модернизация сайта ЦКП ИФМ РАН.
3. Оценка рыночного потенциала полученных результатов.
4. Разработка рекомендаций об использовании полученных результатов, в том числе в реальном секторе экономики, а также в дальнейших исследованиях и разработках.
5. Оформление отчетной документации в соответствии с требованиями Технического задания и актов Заказчика.
6. Исследование параметров системы радиовидения миллиметрового диапазона длин волн и исследования в области рентгеновской литографии. (Внебюджетное финансирование.)

В соответствии с рекомендациями Заказчика эти названия были использованы в качестве заголовков разделов настоящего отчета. В каждом из этих разделов отражены работы, выполненные в указанном в заголовке направлении. Кроме этих разделов, также по рекомендации Заказчика, включен раздел 7, где описаны результаты, полученные на предыдущих этапах НИР, поскольку настоящий отчет является заключительным. Это, в частности, позволило при заполнении Ведомости соответствия результатов НИР требованиям ТЗ указать для каждого из пунктов Технического задания свой раздел Отчета с конкретными страницами.

В Календарном плане на этапе 4 был определен перечень документов, разрабатываемых на этапе:

1. Заключительный Отчет о НИР.
2. Ведомость соответствия результатов НИР требованиям ТЗ.
3. Перечень организаций-заказчиков исследований.
4. Справка о метрологическом обеспечении измерений ЦКП.
5. Перечень сертифицированного оборудования. Перечень аттестованных методик.
6. Перечень публикаций.
7. Перечень дипломных работ и диссертаций.
8. Справка о числе молодых специалистов привлеченных к исследованиям.
9. Актуализированный перечень услуг.
10. Перечень закупленного оборудования.
11. Иные документы, предусмотренные нормативными актами Заказчика

Часть этих документов (2, 6, 7, 8) оформляются в соответствии с формами, предусмотренными Регламентом работ, формы 6, 18.1, 18.7 и 18.3, соответственно, и включаются в комплект отчетной документации в качестве самостоятельных документов. Некоторые документы включены как приложения к Отчету по НИР:

- ✓ Приложение А Перечень организаций – заказчиков исследований.
- ✓ Приложение Б Справка о метрологическом обеспечении измерений ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур».
- ✓ Приложение В Перечень сертифицированного оборудования. Перечень аттестованных методик ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур».
- ✓ Приложение Г Актуализированный перечень услуг ЦКП ИФМ РАН.
- ✓ Приложение Д Перечень закупленного оборудования.

Кроме Отчета о НИР, полный набор документов отчетности по заключительному этапу НИР включает ряд документов:

- 1) Справка о числе организаций-пользователей.
- 2) Справка о числе публикаций.
- 3) Справка о числе дипломных работ.
- 4) Справка о числе диссертаций.
- 5) Справка о численности молодых специалистов, привлеченных к исследованиям.
- 6) Перечень материальных ценностей.
- 7) Отчет о достижении заданных значений программных индикаторов.
- 8) Документы, подтверждающие достижение заданных значений программных индикаторов.
- 9) Справка о числе патентов и поданных заявок на РИД.
- 10) Отчет о правах на РИД.
- 11) Результаты интеллектуальной деятельности (Приложение 21.1).
- 12) Сведения о численности и качественном составе исполнителей работ.
- 13) Копии документов, подтверждающих закупку оборудования.
- 14) Отчет о затратах внебюджетных средств, фактически произведенных при выполнении этапа № 4.
- 15) Распределение внебюджетных расходов по видам работ, произведенных при выполнении этапа № 4.
- 16) Документы, подтверждающие выполнение работ за счет внебюджетных средств.
- 17) Резюме проекта 4 этап.
- 18) Резюме проекта итоговое.
- 19) Справка о числе организаций-пользователей за 2012 год.
- 20) Справка о числе публикаций за период выполнения государственного контракта.

- 21) Справка о числе дипломных работ за период выполнения государственного контракта.
- 22) Справка о числе диссертаций за период выполнения государственного контракта.
- 23) Справка о численности молодых специалистов, привлеченных к исследованиям за 2012 год.
- 24) Перечень материальных ценностей за период выполнения государственного контракта.
- 25) Акт приемки работ (проект).
- 26) Акт сдачи-приемки работ.
- 27) Ведомость соответствия результатов работы требованиям технического задания.
- 28) Письмо об отсутствии соисполнителей.
- 29) Выписка из протокола заседания Ученого Совета ФГБУН ИФМ РАН.

Все эти документы заполнялись в соответствии с формами, разработанными Заказчиком и предоставленными Исполнителю с подробными разъяснениями по их заполнению, что существенно облегчило оформление этих документов, не смотря на их большое число. Всего, с учетом подтверждающих документов, Заказчику передается более 75 документов в комплекте отчетности по настоящему этапу.

6 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ РАДИОВИДЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН И ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИТОГРАФИИ. (ВНЕБЮДЖЕТНОЕ ФИНАНСИРОВАНИЕ)

6.1 Исследование параметров системы радиовидения миллиметрового диапазона длин волн

На настоящем этапе работ были исследованы характеристики линейки планарных детекторов в составе системы визуализации прошедшего излучения при просвечивании объектов излучением миллиметрового диапазона длин волн.

Линейка детекторов состояла из восьми элементов, расположенных в ряд с периодом $3\lambda/2$. В каждом канале была схема усиления и преобразования сигнала. Эксперименты по просвечиванию предметов проводили в установке, блок-схема которой представлена на рисунке 6.1 (на вставке - фотография линейки планарных детекторов).

В качестве источника излучения использовался генератор на лампе обратной волны (ЛОВ). Для вывода излучения в пространство применяли рупор с коэффициентом усиления ~ 75 . Расстояние от конца рупора до плоскости детектирования составляло около 1,5 м. Для регистрации картины поля линейка детекторов механически перемещалась в плоскости по двум ортогональным направлениям. Перемещение в поле сканирования 27×25 см осуществлялось электромеханическим приводом с управлением от компьютера. Компьютер проводил корректировку сигналов в каналах и запись сигналов детекторов во всех положениях приёмной линейки. После математической обработки данные заполняли двумерную матрицу значений интенсивности электромагнитного поля в узлах сетки с шагом перемещения равным $3\lambda/2$ или $3\lambda/4$. Общее время сканирования при минимальном шаге составляло 3÷4 минуты. Амплитудная модуляция сигнала ЛОВ на частоте 1,2 кГц исключала влияние дрейфа смещений на входе операционных усилителей и снизила вклад шумов $1/f$. При ширине полосы пропускания низкочастотного тракта 150 Гц длительность фронтов импульсов составляла ~ 6 мс.

Был изучен режим работы линейки детекторов при различных уровнях мощности источника. Установлено, что приёмная система работает в линейном режиме до уровня мощности источника излучения около 400 мкВт. Минимальным уровнем мощности является 5 мкВт, при этом сигнал отрывается от шумовой дорожки во всей области сканирования. В линейном режиме были определены калибровочные коэффициенты усиления для каждого канала в линейке детекторов. С учетом калибровочных коэффициентов было определено распределение интенсивности электромагнитного поля в области сканирования.

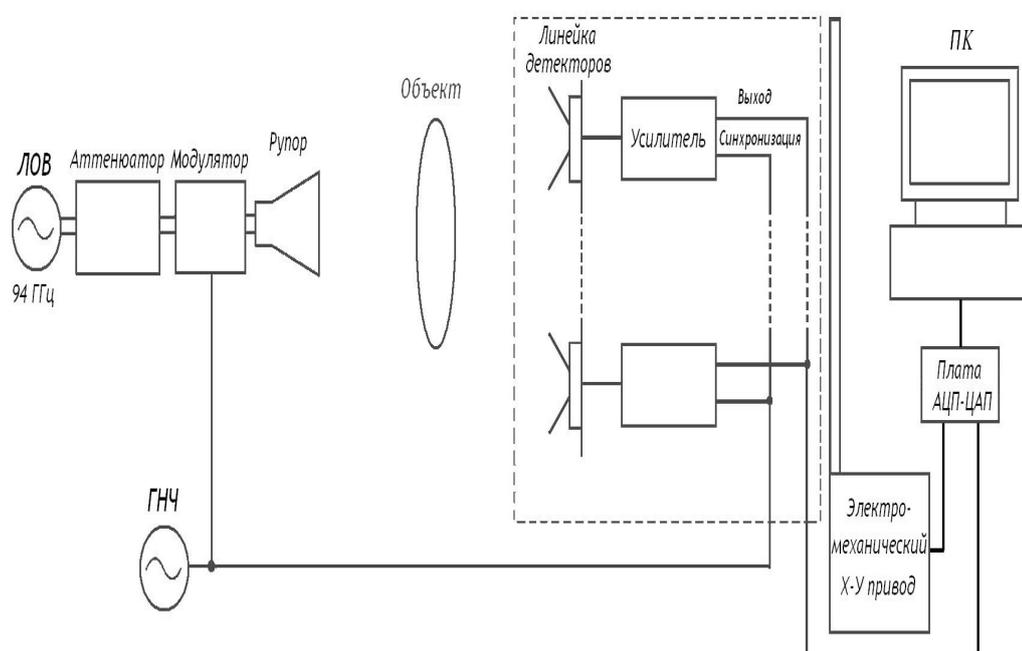
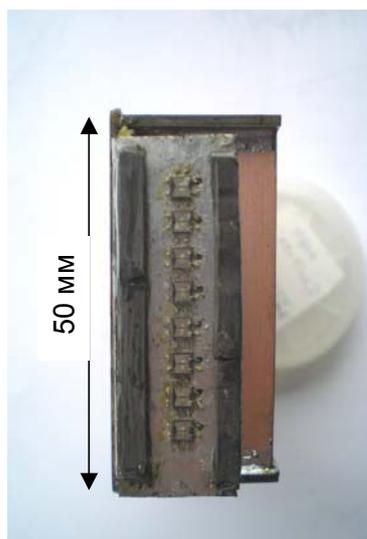


Рисунок 6.1 Фотография линейки планарных детекторов размерностью 8x1 и блок-схема экспериментальной установки по просвечиванию объектов электромагнитным излучением с частотой 94 ГГц.

Оказалось, что распределение интенсивности является несколько неравномерным из-за переотражения от посторонних предметов. На картину распределения поля также влияют шумы схемы преобразования сигнала и нестабильность источника излучения. На рисунке 6.2 представлена гистограмма зависимости количества точек (пикселей) в картине интенсивности излучения, изменяющих сигнал на соответствующую величину в процентах при повторном сканировании (кривая 1).

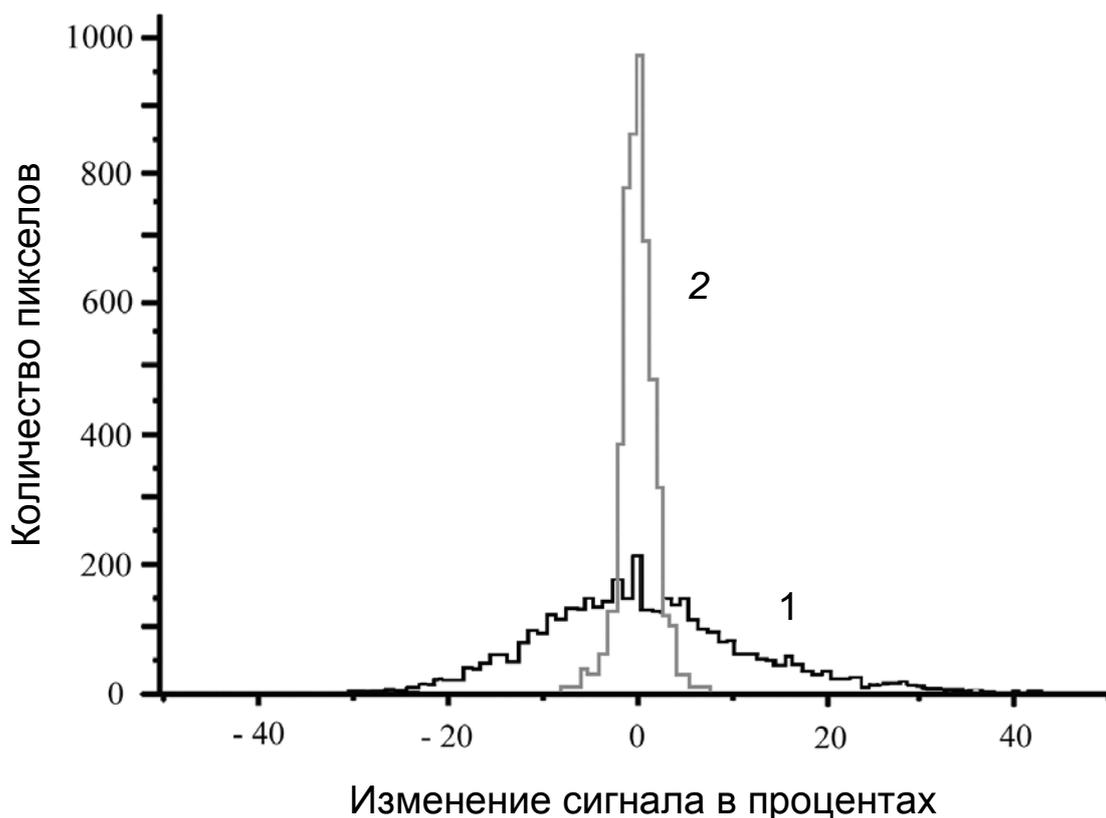


Рисунок 6.2 Распределение количества пикселей, изменяющих регистрируемый сигнал при повторном сканировании: кривая 1 - при использовании лампы обратной волны, кривая 2 - для синтезатора с фазовой автоподстройкой частоты.

Среднеквадратичное отклонение примерно соответствует 10%. Для выявления природы нестабильности были проведены измерения сигнала с линейки детекторов без механического перемещения. Измерения показали, что присутствуют долговременная и кратковременная нестабильности в сигнале. Кратковременная нестабильность (на временных интервалах в несколько секунд) составляет около 1% и вызвана шумами системы регистрации. Долговременная нестабильность вызвана дрейфом в распределении интенсивности поля в плоскости приемников во времени. Изменения интенсивности возрастают при отклонении от основной оси рупора источника излучения. Для улучшения стабильности источника излучения в ряде экспериментов использовался синтезатор с фазовой автоподстройкой частоты. При этом гистограмма сужается, и среднеквадратичное отклонение уменьшается до 1,9% – кривая 2 на рисунке 6.2.

Картина распределения интенсивности излучения в отсутствие объектов между источником и приёмником приведена на рисунке 6.3. Картина представляет набор квадратных точек - пикселей в градациях серого цвета, более светлых при увеличении интенсивности излучения. Число пикселей в строке – 60, в столбце – 56, всего - 3360. Поскольку планарные детекторы чувствительны только к определённой линейной поляризации электромагнитного поля,

была проведена регистрация интенсивности излучения не только в основной моде - рисунок 6.3а, но и для ортогональной поляризации приёмной линейки - рисунок 6.3б. Видно, что в основной моде распределение интенсивности в поле сканирования является достаточно однородным. Отношение максимальной величины интенсивности к минимальной составляет менее 2. В ортогональной поляризации интенсивность излучения уменьшается в среднем более чем на 20 дБ, одновременно возрастает разброс в распределении интенсивности. Наличие периодичности в картине интенсивности на рисунке 6.3б свидетельствует об интерференции паразитных мод синтезатора с фазовой автоподстройкой частоты.

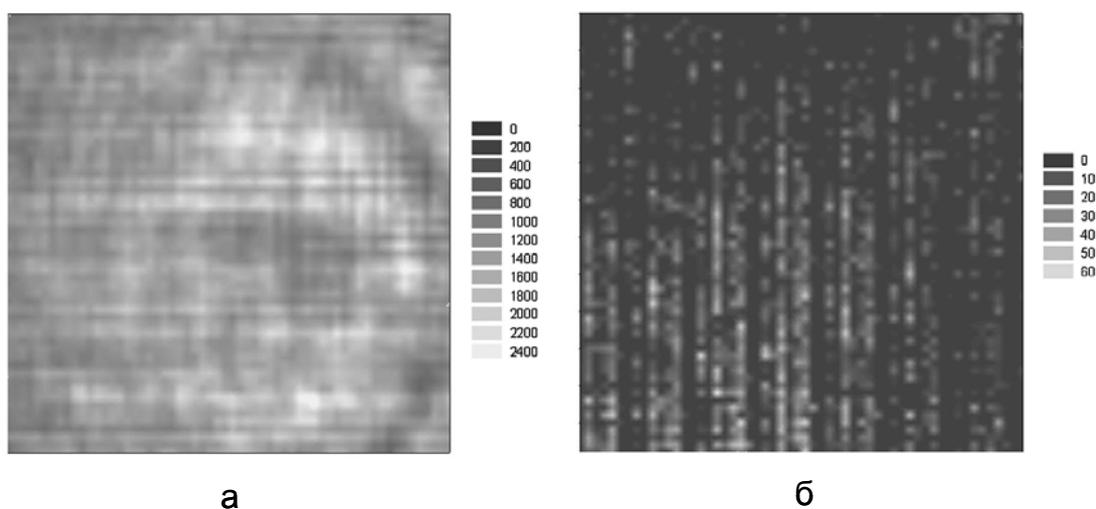


Рисунок. 6.3 Распределение интенсивности падающего поля в области сканирования линейки детекторов: а) – в основной поляризации; б) – в ортогональной поляризации.

При необходимости исходное распределение интенсивности записывается и используется при последующей математической обработке изображений для вычитания или нормировки сигналов с целью повышения контраста картин. Оказалось, что использование стабилизированного источника позволяет регистрировать слабоконтрастные изображения с небольшим изменением интенсивности ($>2\%$). Такое ослабление интенсивности сигнала дают несколько листов плотной бумаги или лист картона. Следует также заметить, что для простых и достаточно контрастных объектов, зрительное восприятие изображения не обнаруживает существенных различий при замене ЛОВ на стабилизированный источник излучения.

Были получены изображения на просвет различных бытовых предметов. Для примера, на рисунке 6.4 представлено изображение пластиковой бутылки с водой на подставке (фотография - на вставке). Видны внешние очертания, уровень воды и дифракционное поле вокруг предмета. Горизонтальные полосы – следствие интерференции прямого и отраженного от подставки излучения ЛОВ. В целом картина интенсивности прошедшего излучения является сложной и зависит от расстояния между объектом и плоскостью сканирования. При уменьшении этого

расстояния вклад дифракционных и интерференционных эффектов снижается, и границы области тени становятся более резкими. Одновременно сближаются светлые и тёмные полосы дифракционной или интерференционной картины. В этих условиях отношение сигналов в соседних планарных детекторах может достигать 100, что является хорошим показателем для линейки с плотной компоновкой (период - $3\lambda/2$). Изображения, представленные на рисунке 6.4, отличаются шагом сканирования: $3\lambda/2$ (а) и $3\lambda/4$ (б). Соответственно количество пикселей на рисунке 6.4б больше в 4 раза и составляет $112 \times 120 = 13440$. Видно, что с уменьшением шага мелкомасштабные полосы проявляются чётче, что позволяет оценить величину пространственного разрешения обоих изображений: $\sim 3\lambda$ и $\sim 2\lambda$, соответственно.

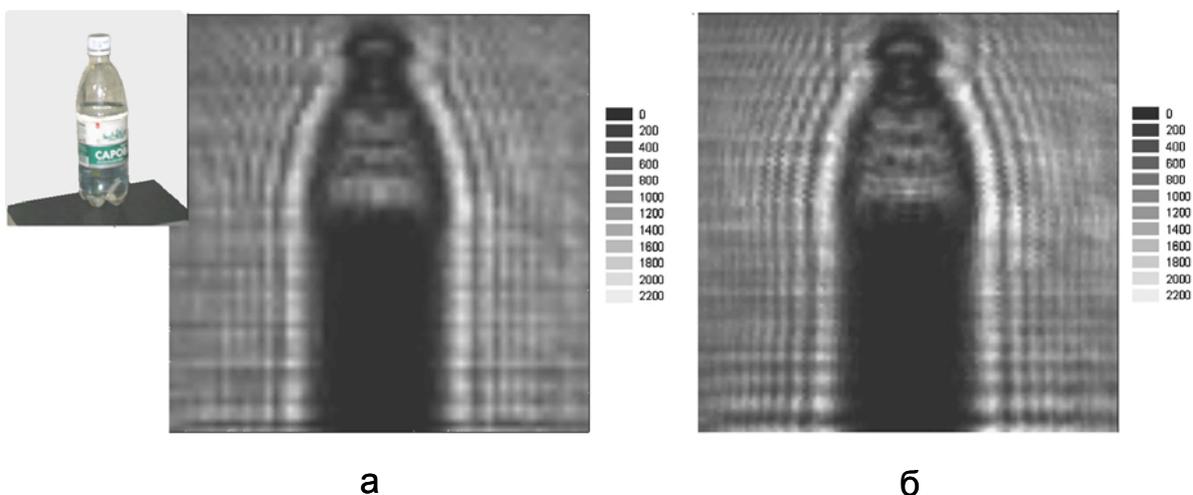


Рисунок 6.4 Изображение пластмассовой бутылки с водой при просвечивании излучением ЛОВ. Шаг сканирования $3\lambda/2$ (а) и $3\lambda/4$ (б). На вставке – фотография объекта.

Эту оценку подтверждают эксперименты по дифракции излучения от стабилизированного источника на решётке щелей в металлическом экране. Полученные изображения приведены на рисунке 6.5 (а – фотография объекта). Размеры щели - 3×50 мм, расстояние между ними - 4 мм. Видно, что при уменьшении шага сканирования от $3\lambda/2$ (рисунок 6.5б) до $3\lambda/4$ (рисунок 6.5в), изображение становится более чётким, с одинаковым контрастом проявляются все дифракционные полосы. Можно сделать вывод, что уменьшение шага сканирования до значений меньше пространственного периода расположения планарных детекторов в линейке повышает разрешение в изображениях объектов при просвечивании. Рисунок 6.5г иллюстрирует эксперимент по получению поляризационно-чувствительного изображения. Наклонённые на 45° щели поворачивают плоскость поляризации прошедшего излучения, и поляризационно-чувствительный приёмник регистрирует достаточно большой сигнал в ортогональной поляризации.

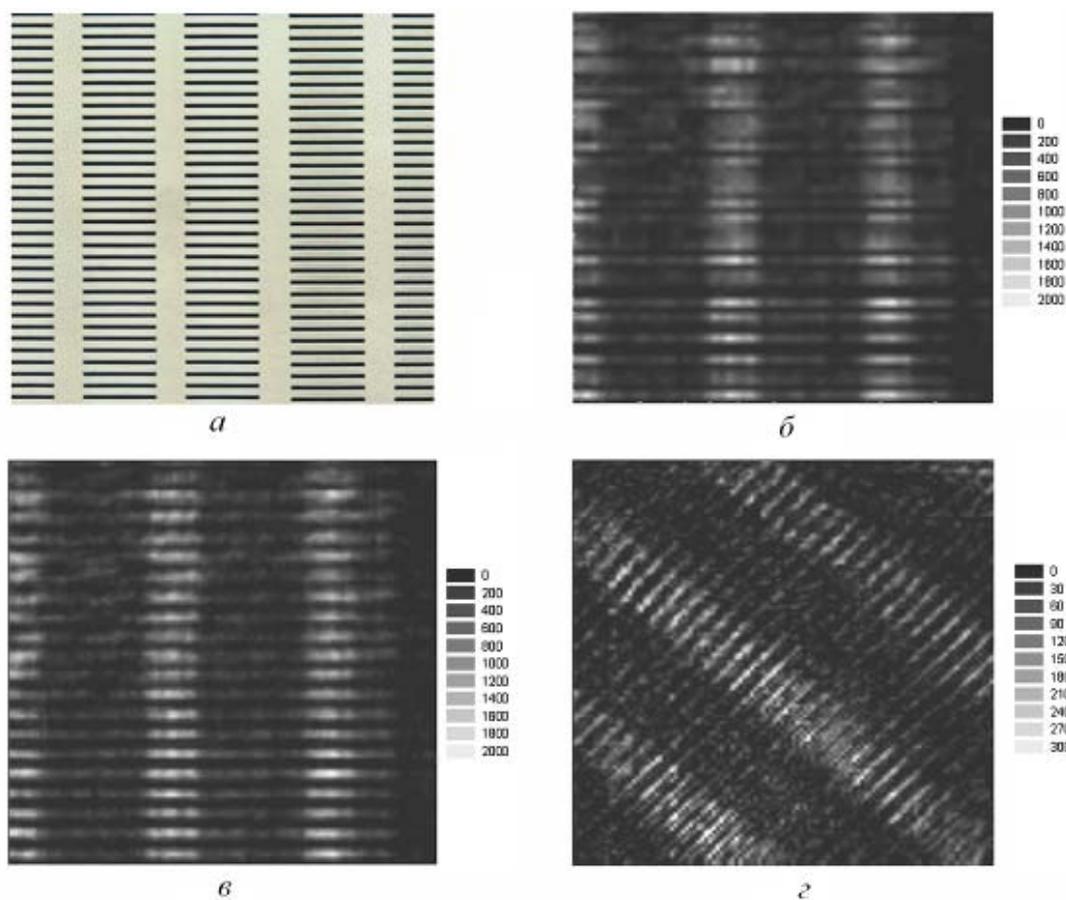


Рисунок 6.5 Тестовое изображение решётки щелей в металлическом экране: а) – фотография, б), в), г) – при просвечивании излучением с частотой 94 ГГц. Шаг сканирования: - $3\lambda/2$ (б); $3\lambda/4$ (в) и (г). Изображение (г) - эффект деполяризации: планарные детекторы ориентированы для приёма ортогональной поляризации по отношению к падающей.

При просвечивании объёмных предметов и в тех случаях, когда плоскость сканирования не может быть приближена к объекту, разрешение мелких деталей ухудшается из-за дифракционного размывания границы области тени.

Таким образом, исследованы параметры экспериментальной системы радиовидения миллиметрового диапазона длин волн. В составе системы визуализации использована линейка планарных детекторов. Линейка состояла из восьми элементов, расположенных в ряд с периодом полторы длины волны. Для регистрации картины поля линейка детекторов механически перемещалась в плоскости по двум ортогональным направлениям. Эксперимент показал, что при просвечивании излучением с частотой 94 ГГц достигнутая величина пространственного разрешения не хуже 3λ . При просвечивании объёмных предметов и в тех случаях, когда плоскость сканирования не может быть приближена к объекту, разрешение мелких деталей ухудшается из-за дифракционного размывания границы области тени.

6.2 Лазерно-плазменный источник ЭУФ излучения для рентгеновской литографии

6.2.1 Введение

Предыдущий опыт эксплуатации источника экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения на основе разборной рентгеновской трубки в составе стенда нанолитографа с рабочей длиной волны 13.5 нм [11] показал, что из-за нагрева элементов оптической схемы, вызванного видимым и ИК излучением термокатода, и рассеянными электронами рентгеновской трубки, происходит разъюстировка оптической схемы. Для поддержания положения элементов оптической схемы в пространстве в пределах номинальных значений приходилось непрерывно, с темпом примерно 1 раз в полминуты, корректировать их положение с помощью пьезокерамических толкателей. Так как подстройка происходила дискретно, все это приводило к резкому падению изображающих свойств объектива. Проблема усугублялась еще и тем, что коэффициент конверсии энергии электронного пучка в энергию излучения с длиной волны 13.5 нм невелик и составляет $3 \cdot 10^{-4} \%$ [12], что требовало длительного времени набора необходимой дозы облучения пластины с фоторезистом.

Для решения этой проблемы был разработан лабораторный источник ЭУФ излучения на основе лазерной плазмы (ЛПИ). Как было показано в ряде работ, при воздействии сфокусированных световых лазерных импульсов с плотностью мощности, лежащей в диапазоне $10^{10} - 10^{12}$ Вт/см², на мишень возникает плазма, которая генерирует коротковолновое излучение, позволяющее решать задачи спектроскопии и метрологии в лабораторных условиях вплоть до нанометровых длин волн. В [13] была измерена абсолютная эмиссионная способность такого источника в диапазоне длин волн 6 -16 нм в зависимости от энергии лазерного излучения в импульсе. Лазер имел следующие характеристиками: рабочая длина волны 532 нм (2-я гармоника Nd:YAG лазера), длительность импульса 10 нс, энергия в импульсе 200-630 мДж; материал мишени Au; диаметр пятна фокусировки >20 мкм; частота следования импульсов 10 Гц. Золотая мишень была выбрана из соображений, что в отличие от легких материалов, в спектре излучения которых в значительном количестве присутствуют линии, золото в ЭУФ диапазоне производит квазимонохроматическое излучение благодаря переналожению большого числа линий $4d^{10} 4f^n \rightarrow 4d^9 4f^{n+1}$ переходов сильно ионизованных состояний. В окрестности длины волны 13.5 нм при оптимальных для генерации излучения в этом диапазоне размерах пятна на мишени 60×100 мкм² коэффициент конверсии энергии лазерного излучения в энергию ЭУФ излучения в спектральной полосе 0.27 нм в телесный угол $\Omega = 2\pi$ страд составил $\eta = 4.4 \times 10^{-3}$ (0.44%). При энергии лазерного импульса $E = 360$ мДж это соответствует энергии ЭУФ излучения 1.6 мДж.

В нашем случае, оптическая схема нанолитографа состоит из 5-ти отражающих и 1-го пропускающего элементов, свет собирается из телесного угла $\Omega = 1$ страд [11,14], в случае, когда

коэффициенты отражения зеркал, маски и пропускание фильтра равны $R=69\%$, резонансные длины волн для всех зеркал совпадают, в схеме отсутствует виньетирование, при частоте следования импульсов $F=10$ Гц подобный источник обеспечит скорость засветки T фоторезиста с чувствительностью $W=5$ мДж/см² на уровне $T = \frac{2\pi \cdot W}{E \cdot F \cdot \Omega \cdot R^6} \approx 20 \text{сек/см}^2$, что вполне достаточно для исследовательских целей и, даже, для мелкосерийного производства. Таким образом, подобный источник может применяться не только для рефлектометрических и спектроскопических задач, но и для проекционной ЭУФ литографии.

Основными недостатками данного источника, не позволяющими применить его в составе станда, являются большие габаритные размеры и сильное поглощение золота в этом диапазоне, так как из-за маленького расстояния между мишенью и коллектором, около 138 мм, практически все продукты эрозии мишени попадают на коллектор. С золотой мишенью эффективность отражения коллектора упадет в 2 раза уже после 13 минут непрерывной работы.

Необходим был ЛПИ, конструкция которого позволила бы интегрировать его в станд литографа без дополнительных, по сравнению с рентгеновской трубкой, потерь на виньетирование, и материал мишени которого обеспечил бы длительный срок работы без очистки коллектора от загрязнений.

6.2.2 Описание лазерно-плазменного источника

Схема ЛПИ, разработанного в данной работе, приведена на рисунке 6.6.

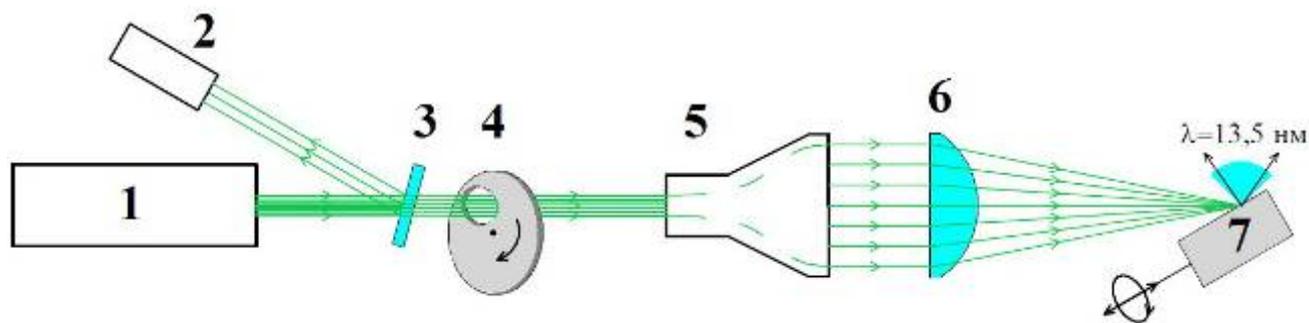


Рисунок 6.6 Схема лазерно-плазменного источника ЭУФ излучения. 1 – Nd:YAG лазер, 2 – измеритель мощности лазерного излучения, 3 – полупрозрачная пластинка, 4 – электромеханическая заслонка, 5 – расширитель лазерного пучка, 6 – плоско-выпуклая линза, 7 – молибденовая мишень, совершающая вращательное и поступательное движение

В качестве источника лазерного излучения использовался твердотельный Nd:YAG лазер компании «СОЛАР ТИИ» LF117. Основные характеристики лазера: длина волны 532 нм (2-я гармоника), энергия в импульсе до 500 мДж, длительность импульса 10 нс и частота следования до 10 Гц.

Фотография лазерной системы приведена на рисунке 6.7 а. Часть лазерного пучка, 8% по данным калибровки, отражается от стеклянной пластины (рисунок 6.6, поз. 2) и попадает в измеритель мощности (поз. 3). Основной пучок через управляемую компьютером заслонку (поз. 4) проходит далее через специальное отверстие в стене к нанолитографу. Пройдя через поворотные призмы, лазерный луч попадает в расширитель пучка (телескоп, поз. 5).

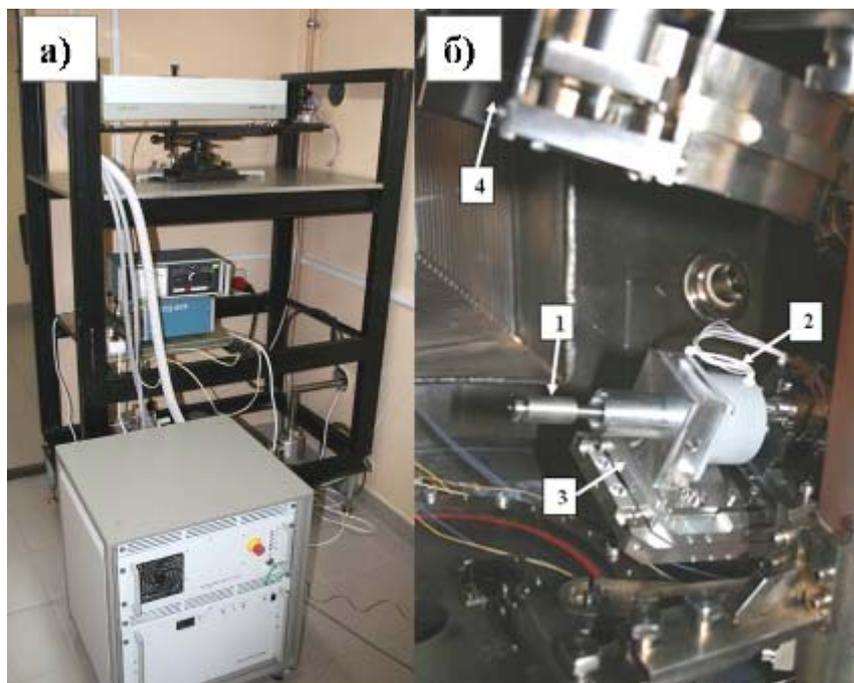


Рисунок 6.7 Фотографии лазерной системы – а) и мишени, установленной в нанолитографе – б). 1 – молибденовая мишень, 2 – шаговый двигатель, 3 – линейный транслятор, 4 – коллектор.

На выходе расширителя мы имеем квазипараллельный пучок диаметром 60 мм. Применение расширителя позволяет удалить источник «на бесконечность» и увеличить числовую апертуру фокусирующей линзы при сохранении длинного фокуса. Необходимость использования в ЛПИ длиннофокусных фокусирующих систем объясняется тем, что продукты эрозии мишени загрязняют поверхность окна, через которое лазерное излучение попадает в вакуумный объем. Расширенный пучок, проходя через линзу (поз. 6) фокусируется на мишени (поз. 7). ЭУФ излучение плазмы собирается коллектор (рисунок 6.7 б), поз. 4).

Мишень (поз. 1), представляет собой молибденовый цилиндр, установленный на ось шагового двигателя (поз. 2). После каждого лазерного импульса мишень поворачивается на 1 шаг. В линейных величинах это составляет 100 мкм. После завершения полного оборота мишени она, с помощью линейного транслятора (поз. 3), управляемого шаговым двигателем, перемещается на 100 мкм. Процесс повторяется. Практика показала, что такая система сканирования, когда

лазерный луч каждый раз попадает в новое место, обеспечивает стабильность эмиссионных характеристик и снижает загрязнение оптики продуктами эрозии мишени.

Выбор в качестве материала мишени молибдена обусловлен его относительно малым для «тяжелых» материалов поглощением на длине волны 13.5 нм. Причиной выбора этого критерия как основного является маленькое, 138.2 мкм, расстояние между мишенью и коллектором (поз. 1 и 4). Как показывают оценки при площади пятна фокусировки 10^4 мкм² и глубине кратера 10 мкм, вынос вещества за один импульс составляет около 1 микрограмма, что приводит к запылению коллектора на $8 \cdot 10^{-4}$ нм. При такой скорости роста пленка молибдена толщиной 55 нм (падение коэффициента отражения от коллектора составит 2 раза) вырастит за $7 \cdot 10^4$ выстрелов или за 20 часов непрерывной работы, что соответствует, при планируемой частоте проведения экспериментов, полугоду работы. После снижения эффективности коллектора в 2 раза, производится химическая очистка поверхности от пленки.

6.2.3 Экспериментальные результаты

Основным параметром ЛПИ является коэффициент конверсии энергии лазерного излучения в ЭУФ. Традиционно для проекционной ЭУФ литографии коэффициент конверсии определяется как отношение ЭУФ энергии излученной в полупространство в 2-х процентной спектральной полосе в окрестности длины волны 13.5 нм (полоса пропускания традиционной оптической схемы с 6-ти зеркальным проекционным объективом) к энергии лазерного импульса. Коэффициент конверсии является сложной функцией материала и размера (в случае использования капель) мишени, способа освещения (наличие предимпульса, создающего низкотемпературную плазму) и ряда других факторов. Ключевыми являются материал мишени (наличие или отсутствие спектральных линий ионов в рабочем диапазоне) и плотность мощности лазерного излучения в пятне фокусировки. При облучении оловянной мишени излучением CO₂-лазера, длина волны 10.6 мкм, он составляет более 1% [15].

В данной работе измерение коэффициента конверсии проводилось с использованием измерителя мощности с абсолютно калиброванными чувствительностью и спектральной полосой пропускания. Полоса пропускания измерителя, см. рисунок 6.8, определяется двумя отражениями от многослойных зеркал M1 и M2.

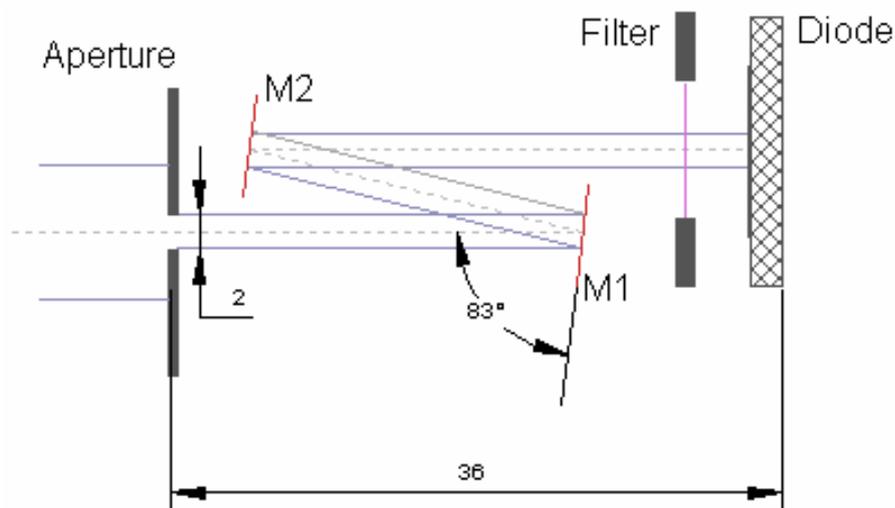


Рисунок 6.8 Рентгенооптическая схема измерителя мощности. M1 и M2 – многослойные зеркала.

Длинноволновое излучение отсекается с помощью абсорбционных фильтров. Первый фильтр (на рисунке не показан) устанавливается на колесе, управляемом шаговым двигателем и может вводиться, и выводится из пучка без вскрытия прибора на атмосферу. Второй фильтр установлен на постоянной основе. Калибровка чувствительности прибора производилась следующим образом. Сначала с помощью рефлектометра [16] изучались спектральные зависимости коэффициентов отражения зеркал и пропускания фильтров. Далее, на синхротроне BESSY-2 был измерен полный коэффициент пропускания двухзеркального монохроматора. Результаты измерений совпали с точностью лучше 3-х %. Чувствительность детектора - полупроводникового диода AXUV-100, компании IRD [17], бралась от производителя и на длине волны 13.5 нм составляла $0.19 \text{ A/Wt} \pm 10\%$. С учетом коэффициентов отражения и пропускания элементов полная чувствительность прибора с двумя фильтрами была оценена как $0.0083 \text{ A/Wt} \pm 10\%$. Подробнее о приборе можно найти в [18].

Эксперименты проводились при энергии лазерного излучения в импульсе 250 мДж и частоте следования импульсов 10 Гц. Телесный угол, из которого излучение из источника регистрировалось измерителем мощности, составил $\Omega = 7.9 \cdot 10^{-5}$ страд. На рисунке 6.9 в относительных единицах приведена зависимость регистрируемого сигнала от расстройки фокусирующей линзы.

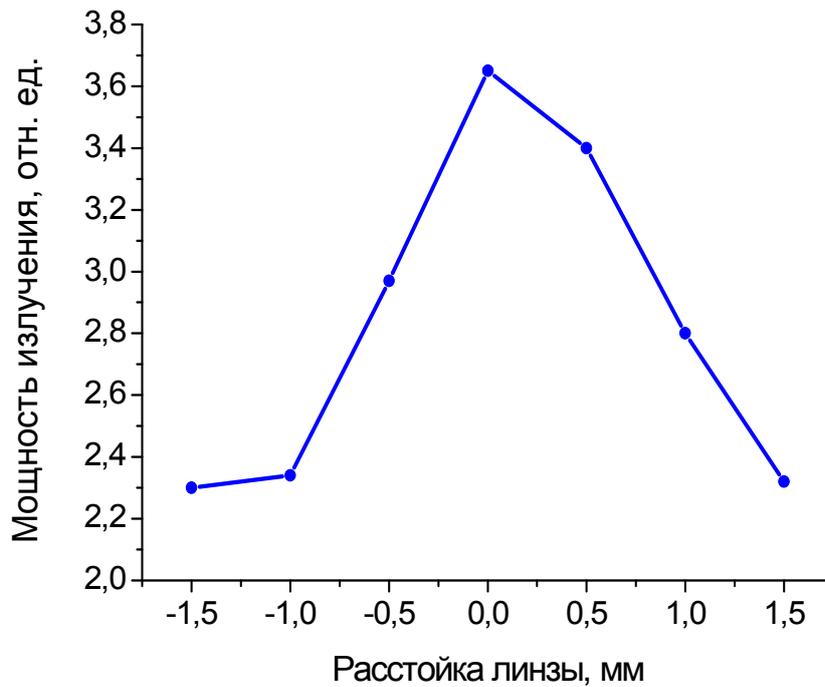


Рисунок 6.9 Зависимость ЭУФ мощности от расстройки фокусирующей линзы.

Как видно из рисунка, коэффициент конверсии сильно зависит от положения фокусирующей линзы. Измеренная в максимуме ЭУФ мощность составила 8.4 нВт, что в пересчете на полупространство, соответствует 0.7 мВт полной мощности, генерируемой источником. Соответственно коэффициент конверсии энергии лазерного излучения в ЭУФ составил 0.03%, что на 2 порядка превышает аналогичную характеристику линейчатого излучения рентгеновских трубок [12,19].

Для изучения загрязнения коллектора продуктами эрозии мишени на коллектор устанавливался свидетель, представляющий собой многослойное Mo/Si зеркало, нанесенное на кремниевую подложку с размерами $15 \times 15 \text{ мм}^2$. Половина образца закрывалась экраном, а другая половина подвергалась загрязнению. После продолжительного периода экспериментов, суммарное время экспозиции $1.51 \cdot 10^3$ секунд ($1.51 \cdot 10^4$ импульсов), образец снимался, и проводилось измерение коэффициентов отражения. На рисунке 6.10 приведены измеренные спектральные зависимости коэффициентов отражения в закрытой, верхняя кривая, и открытой, нижняя кривая, областях.

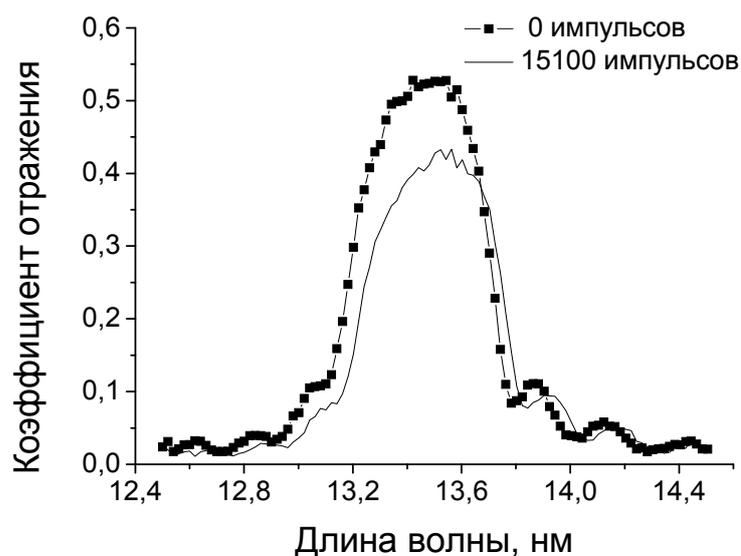


Рисунок 6.10 Спектральные зависимости коэффициента отражения Mo/Si зеркала-свидетеля для закрытой (верхняя кривая) и открытой (нижняя кривая) областей.

Как видно из рисунка, коэффициент отражения снизился примерно в 1.2 раза, что соответствует темпу загрязнения $1.15 \cdot 10^{-3}$ нм/импульс.

6.2.4 Обсуждение результатов

Создан лабораторный источник ЭУФ излучения на основе лазерной плазмы. Измеренный коэффициент конверсии энергии лазерного излучения в ЭУФ при работе с молибденовой мишенью составил 0.03%. Оригинальная конструкция узла мишени, в отличие от предложенной в [13], где сканирование осуществляется с использованием вакуумных вводов вращения и линейного перемещения, резко сократила габаритные размеры мишени, что, в конечном итоге, позволило встроить этот источник в действующий стенд ЭУФ литографа без дополнительных потерь мощности из-за экранирования. Достаточно высокая мощность ЭУФ излучения, в совокупности с малым энерговыделением (около 2.5 Вт) внутри установки, позволили впервые в России получить микроструктуры методом проекционной ЭУФ литографии. С учетом потерь на отражение многозеркальной системой, производительность литографа с данным ЛПИ составила $1.8 \text{ см}^2/\text{час}$, что вполне достаточно для научных и технологических исследований.

Выбор молибдена в качестве материала для мишени был продиктован его относительно низким поглощением в окрестности 13.5 нм. Измеренный темп загрязнения оказался примерно в 1.4 раза выше, чем расчетный, что может быть объяснено ошибкой при выборе площади и глубины кратера, анизотропией диаграммы разлета вещества, а так же дополнительным поглощением,

вызванным продуктами декомпозиции углеводов при воздействии ионизирующего коротковолнового излучения и электронов. Тем не менее, эта величина находится близко к расчетному значению, что подтверждает возможность долговременной работы без очистки коллектора.

Измеренный коэффициент конверсии энергии лазерного излучения в ЭУФ оказался в 30-40 раз меньше, чем для оловянной мишени [14]. Такое отличие связано, как со способом формирования лазерной плазмы, в [14] перед импульсом мощного CO₂ лазера мишень облучается маломощным Nd:YAG-лазером, создающим относительно низкоплотную и низкотемпературную плазму, так и с тем, что в случае олова характеристические линии многократно заряженных ионов лежат в рабочем диапазоне, в то время как у молибдена в этом спектральном диапазоне мы фактически имеем излучение нагретого тела. Сравнение поглощения олова и молибдена на длине волны 13.5 нм показывает, что коэффициент отражения коллектор упадет в 2 раза при запылении слоем олова толщиной около 8 нм, что почти в 7 раз меньше, чем в случае молибдена. Однако с учетом перспективы увеличения коэффициента конверсии в 30-40 раз, можно ждать выигрыша в производительности и времени непрерывной работы с оловянной мишенью. Поэтому замена молибдена на олово является многообещающей.

Таким образом, показано, что малогабаритные, относительно маломощные (мощность лазерного излучения менее 10 Вт) твердотельные лазеры могут применяться в качестве эффективных источников ЭУФ излучения в составе установок проекционной ЭУФ литографии, решающих исследовательские задачи.

7 РАБОТЫ, ВЫПОЛНЕННЫЕ НА ПРЕДЫДУЩИХ ЭТАПАХ НИР

7.1 Развитие Центра коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур»

В настоящем разделе кратко описаны работы по развитию ЦКП ИФМ РАН, выполненные на предыдущих этапах 1-3 настоящей НИР. В подразделе 7.1.1 описан весь комплект оборудования, закупленного в рамках госконтракта, в подразделе 7.1.2 - новые методики и новые виды услуг, в подразделе 7.1.3 – процедуры предоставления услуг сторонним организациям, в подразделе 7.1.4 – работа по составлению новой Программы развития ЦКП ИФМ РАН. Выполненные на этапе 4 работы по модернизации сайта ЦКП ИФМ РАН отдельно были представлены в разделе 2.

7.1.1 Оборудование, приобретенное в рамках НИР

В Приложении Д, таблица Д.1, приведена информация об оборудовании, приобретенном на протяжении всего периода выполнения госконтракта. Поскольку часть накладных на оборудование содержит длинное перечисление всех составных частей с их ценами, а часть – всю установку одной строкой, в таблицу Д.1 по каждой из позиций включен только сам комплект, без перечисления составных частей. Полный список приведен в отчетной Форме 20 в комплекте документов отчетности по госконтракту. Затраты на приобретение оборудования составили 89 % от средств федерального бюджета предусмотренных на реализацию данного контракта. Закупленное спецоборудование прошло этап пуско-наладочных работ и успешно введено в эксплуатацию:

- Источник бесперебойного питания Smart-UPS VT 30kVA использован для обеспечения бесперебойного питания в аварийных ситуациях для нового просвечивающего электронного микроскопа LIBRA 200MC (Carl Zeiss NTS GmbH, Germany, 2010 г.).
- Рентгеновский дифрактометр Bruker D8 Discover – наиболее дорогостоящее оборудование, приобретенное по настоящему госконтракту. D8 Discover имеет гониометр высокого разрешения с системой прямого оптического отслеживания позиции, минимальный шаг 0.0001 , воспроизводимость установки по углам ω и $2\theta \pm 0.0001^\circ$. Рентгеновская дифрактометрия - оперативный и высокоинформативный метод анализа эпитаксиальных слоев. В настоящее время на РД- оборудовании в ЦКП ИФМ РАН выполняется анализ структур, выращенных в реакторах молекулярно-пучковой, газофазной эпитаксии, лазерного и магнетронного напыления, несколько сот образцов в год с 10 реакторов ИФМ РАН, НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, ИХВВ РАН, ИПФ РАН и ряда предприятий города Нижнего Новгорода. Типы структур весьма разнообразны: сверхрешетки и структуры с квантовыми ямами и квантовыми точками на основе полупроводниковых твердых растворов GeSi, AlGaAs, InGaAs, InGaP,

AlGaN для диодных, транзисторных, лазерных и микромеханических приложений; слои высокотемпературных сверхпроводников YBCO для высокочастотных резонаторов и стандартов напряжений; разнообразные монокристаллические подложки и буферные слои. По данным РД от тестовых образцов производится калибровка потоков в реакторах эпитаксиального роста, с чем связано требование оперативности исследований. Для ЦКП особенно важно, что отдельные блоки рентгенооптической схемы легко заменяются без ручной юстировки прибора, что делает прибор высоко универсальным. Это достигнуто благодаря тому, что система управления автоматически распознает установленные компоненты и проводит необходимую конфигурацию. В пункте 1.1 уже приведено несколько характерных примеров применения D8 Discover в ходе работ по настоящему этапу госконтракта.

- Лазерный генератор изображения μ PG101 (установка бесконтактной лазерной литографии) предназначена для создания топологии микроструктур на кремнии, стекле, различных пленках и любых других плоских образцах, покрытых фоторезистами с минимальными размерами элемента до 1 мкм, без использования фотошаблонов, формируя рисунок графическими средствами компьютера. Она обеспечивает автоматическое послойное совмещение и возможность формирования 3D структур. Такая установка, μ PG101 лазерный генератор изображения компании Heidelberg, Германия, была закуплена и введена в эксплуатацию. В Центре коллективного пользования "Физика и технология микро- и наноструктур" активно ведутся научные исследования полупроводниковых, металлических и сверхпроводящих гетеро- и наноструктур. Одним из важнейших этапов формирования лабораторных образцов микро- и наноструктур является фотолитография, однако этот процесс в обычном его исполнении требует больших затрат на изготовление фотошаблонов, процессы засветки, проявки, совмещения. Для ЦКП на много более выгодной стала установка μ PG101, ориентированная на создание единичных образцов наноструктур, где луч лазера наносит рисунок на фоторезист под управлением компьютера.
- Вакуумная установка СММ-2000 - высоковакуумная установка исследования многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур методами микроскопии в процессе плазменного напыления-перепыления с контролем шероховатости и качества их поверхности. Важной особенностью здесь является возможность исследования образцов непосредственно в реакторах напыления без вынесения на воздух, в вакуумном объеме реактора. Во многих случаях такие исследования дают уникальную информацию, без которой невозможна отработка процессов нанесения слоев, и которую невозможно получить на образцах, извлеченных из реактора на воздух, где происходит быстрая деградация поверхностных слоев. Вторая, и очень важная для развития ЦКП область, в которой важна для ЦКП ИФМ РАН эта установка, - это метрологическое обеспечение приборов, методик и контрольных образцов. Приборы, поставленные в комплекте

установки СММ-2000 (профилометр модели 130 и микроскоп сканирующий зондовый СММ-2000), предназначены для внеплазменного контроля поверхностей в установке СММ-2000, и используются нами, в том числе, как отдельные измерительные приборы. Для каждого из них выполнены пуско-наладочные работы и ввод в эксплуатацию. Эти приборы и тестовые образцы к ним важны для ЦКП ИФМ РАН своей метрологической обеспеченностью, поскольку внесены в Реестр измерительных средств России и имеют Акты метрологической поверки.

- Установка физического осаждения в вакууме Amod 206 производства компании Angstrom Engineering предназначена, в основном, для нанесения высококачественных металлических контактов, необходимых для измерения электрических параметров образцов. Установка была описана в пункте 1.1. Благодаря широким возможностям настройки оборудования установка оказалась очень полезной при формировании детекторов терагерцового диапазона на основе низкобарьерных диодов, см. раздел 4 настоящего отчета.
- Генератор сигналов Agilent Technologies E8257D подробно описан в п. 1.2. В настоящем подразделе еще раз отметим, что в ЦКП ИФМ РАН проводятся разнообразные работы, для осуществления которых требуется генератор сигналов синтезаторного типа с высокой стабильностью частоты в диапазоне до 50 ГГц и выходной мощностью выше 10 мВт. В частности, это исследование умножителей частоты на полупроводниковых сверхрешетках. В зависимости от мощности входного сигнала, которая должна быть более 5 мВт, и частоты сигнала измеряется мощность гармоник в терагерцовом диапазоне; спектрометрические исследования внутримолекулярных энергетических переходов, гигагерцового и терагерцового диапазонов частот; подавление помех в измерительной аппаратуре с помощью фильтров с динамическим диапазоном более 100дБ. Для измерения АЧХ и настройки таких фильтров требуются генераторы с высокой стабильностью частоты и большой мощностью выходного сигнала.
- Станция ожижения гелия Cryomech LHeP18 с системой сбора газообразного гелия описана в пункте 1.3 настоящего отчета. Следует отметить, что система удовлетворяет достаточно жестким требованиям, связанным с особенностями функционирования ЦКП ИФМ РАН: возможность автоматической круглосуточной работы станции при минимальном участии оператора; возможность получать несколько десятков литров жидкого гелия в сутки при использовании системы сбора газообразного гелия; совместимость с имеющимся газовым и криогенным оборудованием, в частности, с транспортными дьюарами и стандартными баллонами для газообразного гелия; наличие компрессора и гелиевого газгольдера; низкое энергопотребление; наличие в Российской Федерации фирмы, производящей сервисное обслуживание и, при необходимости, ремонт установки.

- Атомно-силовой микроскоп Ntegra Prima описан в пункте 1.4 настоящего отчета. Прибор важен для контроля оптических элементов изображающей оптики дифракционного качества (пространственное разрешение определяется дифракцией света), где требования на допустимые дефекты (шероховатости) поверхности составляют 3-5 ангстрема в диапазоне пространственных частот $10^{-6} - 10^3$ мкм⁻¹ (диапазон латеральных размеров от метра до 1 нм).
- Центрифуга для нанесения фоторезиста модели SPIN-1200D производства фирмы MIDAS System Co., Ltd. (Корея) в комплекте с держателями пластин описана в пункте 1.5. Центрифуга, по сравнению с существующей, кроме большего диаметра пластин обеспечивает более равномерное точное и воспроизводимое нанесение фоторезиста и минимизацию размеров валика фоторезиста по краю образца не только на круглых подложках, но и на кусочках пластин, что очень важно для лабораторной технологии. Уменьшение толщины валика фоторезиста по краю образца позволит получить лучший оптический контакт с фотошаблоном и достигнуть разрешения 1 мкм. Этот параметр принципиально важен для диодов с размерами до нескольких микрометров.
- В ходе выполнения госконтракта приобретались также материалы и комплектующие, необходимые для поддержания работоспособности оборудования ЦКП ИФМ РАН.

7.1.2 Разработка новых методик измерений и новых видов услуг

В ЦКП ИФМ РАН постоянно ведутся работы по совершенствованию методов анализа с использованием оборудования ЦКП. Новые методики и виды услуг появляются в ходе освоения возможностей нового оборудования, например, дифрактометра Bruker D8 Discover, и в ходе расширения возможностей старого, ранее закупленного оборудования, например, вторично-ионного масс-спектрометра TOF.SIMS-5, поскольку приборы такого уровня сложности имеют большой запас по развитию аналитических методик.

Ниже приводится краткое описание разработанных методик.

- Анализ чувствительности масс-спектрометра TOF.SIMS-5 к матричным элементам в слоях GeSi при регистрации комплексных ионов (этап 1). В результате серии экспериментов было показано, что использование комплексных ионов Ge_2^- , Cs_2Ge^+ позволяет в значительной степени преодолеть влияние матричных эффектов при ВИМС-анализе слоев GeSi. Наиболее точные значения концентрации твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ получаются при использовании отношения интенсивностей $\text{CsGe}^+/\text{CsSi}^+$ в зависимости от $x/(1-x)$. Коэффициенты наклона калибровочной прямой зависят от условий эксперимента и выбора изотопов, в частности, чувствительность метода повышается ~ в 2 раза при использовании изотопа ⁷⁴Ge вместо ⁷⁰Ge.
- Количественный безэталонный анализ концентрации изотопов 28,29,30Si в кремнии методом ВИМС на установке TOF.SIMS-5 (этап 1). Как правило, для анализа изотопного состава

образцов Si используются методы масс-спектрометрии, требующие достаточно большого количества материала, начиная от нескольких мг. При этом чаще всего также необходимо наличие эталонных структур Si с калиброванным содержанием изотопов. Альтернативу этим методам измерений может составить использование вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС). В данной методике использована возможность количественного безэталонного анализа содержания изотопов $^{28-30}\text{Si}$ в образцах кремния в широком диапазоне вариации изотопа ^{28}Si методом ВИМС на установке TOF.SIMS-5. На установке TOF.SIMS-5 проблему насыщения детектора ионов при анализе сильной линии ^{28}Si удастся решить путем использования пуассоновской коррекции мертвого времени детектора. Необходимым условием анализа является высокое массовое разрешение, позволяющее разделять близкие линии ^{29}Si и ^{28}SiH в масс-спектрах, которые отличаются всего на 0,006 а.е.м.. Водород всегда является одной из основных примесей в Si и образует сильные линии кластеров SiH при регистрации как положительных, так и отрицательных ионов. В установке TOF.SIMS-5 с время-пролетным масс-анализатором реализовано высокое массовое разрешение, превышающее 10000, что позволяет уверенно разделить линии ^{29}Si и ^{28}SiH в масс-спектрах и выполнять анализ изотопного состава кремния.

- Методика нормировки по глубине профилей состава слоев, зарегистрированных методом вторично-ионной масс-спектрометрии, с использованием оптической измерительной системы Talysurf CCI-2000 (Этап 1). Методика включает измерение глубины кратера ВИМС на Talysurf CCI-2000, что позволяет нормировать профиль ВИМС по глубине. Методика обеспечивает точность 1% на глубине 5 мкм.
- Определение параметров структуры низкобарьерного диода с приповерхностным дельта-легированием из температурных зависимостей ВАХ (этап 2). Диагностика параметров диодной структуры из-за очень близкого (3-5 нм) расположения дельта-слоя к границе металл-полупроводник является сложной задачей и до настоящего времени практически не решена. Задача состоит в том, чтобы определить основные внутренние параметры (глубину залегания d_0 и слоевую концентрацию доноров N^{2D} в δ -слое) изготовленного диода. Задача осложняется тем, что эффект снижения высоты барьера в первом приближении (при условии доминирующей роли туннелирования) определяется произведением этих параметров. Поэтому для их независимого определения необходима дополнительная информация, в качестве которой мы использовали температуру. Предложена методика оценки параметров структуры низкобарьерных диодов, изготовленных на основе эффекта приповерхностного дельта-легирования, из обработки температурных зависимостей экспериментальных вольт-амперных характеристик. Это стало возможно благодаря разработанной для них теории переноса носителей через модифицированный барьер металл-полупроводник. Полученные данные

позволили уточнить ростовые параметры процессов для получения оптимальных, с точки зрения детекторных характеристик, микроволновых диодов, применяемых в матричных системах радиовидения.

- Анализ концентрации твердых растворов (Al,Ga)As методами вторично-ионной масс-спектрометрии и рентгеновской дифрактометрии (Этап 3). Задачей было определение чувствительности и построение градуировочных кривых для времяпролетного (*time-of-flight*) масс-спектрометра TOF.SIMS-5 при послойном анализе концентрации матричных элементов в слоях твердого раствора (Al,Ga)As. В качестве независимого метода анализа для серии тестовых образцов использован метод рентгеновской дифрактометрии, для которого имеются надежные данные по положению дифракционных пиков $Al_xGa_{1-x}As$ в зависимости от концентрации твердого раствора. Методика рентгеновского анализа была доработана, она учитывает остаточные упругие напряжения в слое и обеспечивает точность 2%, и совместима с действующими алгоритмами расчета спектров рентгеновской дифракции по динамической теории рассеяния. В результате анализа серии тестовых образцов показано, что при использовании в масс-спектрометре TOF.SIMS 5 распыляющих ионов Cs^+ и анализирующего пучка Bi^+ , близкой к линейной является зависимость $Y(CsAl^+)/Y(CsAs^+)$ от $x(AlAs)$ в положительной моде анализируемых ионов и $Y(AlAs^-)/Y(As^-)$ от $x(AlAs)$ в отрицательной моде.
- Способ учета параметра сдвига при восстановлении распределения состава полупроводниковых структур по глубине в методе ВИМС (Этап 3). В современной полупроводниковой технологии часто требуется сформировать структуры с тонкими δ -легированными слоями, залегающими близко к поверхности. Такого типа структуры используются, в частности, для детекторов микроволнового излучения на основе диодов Шоттки с пониженной эффективной высотой барьера. Глубина залегания δ -слоя и форма профиля концентрации примеси являются важными параметрами, определяющими транспортные свойства диодов. Метод ВИМС позволяет проводить анализ таких структур, однако сдвиг и уширение профиля в эксперименте могут вносить существенную систематическую погрешность в определение глубины залегания и толщины слоя. В данной методике предлагается алгоритм обработки экспериментальных профилей ВИМС. При его разработке реализованы алгоритмы решения прямой и обратной задач послойного анализа с применением метода регуляризации Тихонова к решению обратной задачи интегрального уравнения свертки в Фурье-пространстве. Метод восстановления профилей концентрации реализован с учетом физических особенностей послойного анализа ионным распылением. Сдвиг экспериментального профиля при восстановлении проводится путем совместного решения прямой и обратной задач послойного анализа, что не требует дополнительных

измерений. Разработанный алгоритм протестирован как на смоделированных, так и на экспериментальных профилях. Было показано, что предложенный подход позволяет повысить информативность послойного анализа и разрешение метода по глубине.

Разработанные методики после тщательной их проверки служат основой для включения нового вида услуг ЦКП ИФМ РАН. В ходе выполнения НИР в Перечень дополнительно введено несколько новых услуг:

- «Послойный анализ гетеросистем GeSi/Si методом вторично-ионной масс-спектрометрии на приборе TOF.SIMS-5» с использованием методики калибровки концентрации матричных элементов.
- «Послойный анализ гетеросистем AlGaAs/GaAs методом вторично-ионной масс-спектрометрии на приборе TOF.SIMS-5» с использованием методики калибровки концентрации матричных элементов.
- «Рентгенофазовый анализ поликристаллических образцов» с использованием дифрактометра Bruker D8 Discover и базы данных PDF-2.

В Приложении Г настоящего отчета приведен обновленный Перечень услуг ЦКП ИФМ РАН, размещенный также и на сайте ЦКП, что позволяет сторонним организациям выбирать необходимые для себя виды исследований.

7.1.3 Предоставление услуг сторонним организациям-заказчикам

Согласно действующему «Положению о Центре коллективного пользования научным оборудованием “ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР” (ЦКП ИФМ РАН)», основной целью деятельности ЦКП является обеспечение доступа заинтересованным организациям и исследовательским группам к современному дорогостоящему научному оборудованию для проведения исследований на условиях центра коллективного использования, а также оказание услуг исследователям и научным коллективам как базовой организации, так и иным заинтересованным пользователям. Основные научные направления ЦКП: физика поверхности, физика твердотельных наноструктур, физика сверхпроводников, многослойная рентгеновская оптика, а также технология и применение тонких пленок, поверхностных и многослойных структур.

Услуги коллективного пользования научным оборудованием могут предоставляться как на возмездной, так и на безвозмездной основе. Оказание услуг на возмездной основе осуществляется на основе договора между организацией-заказчиком и ИФМ РАН. Используется Типовой договор на проведение научных исследований и оказание услуг. Перечень типовых услуг ЦКП, используемое оборудование и форма заявки представлены на сайте ЦКП в сети Интернет.

Услуги на безвозмездной основе оказываются без оформления договора. Как правило, это небольшие по объему работы, оформление договора на которые признается нецелесообразным. Они выполняются в порядке оказания научно-технического содействия, либо в рамках выполнения совместных НИР, и часто служат рекламой возможностей ЦКП на начальном этапе работ с организацией-заказчиком. Документом, подтверждающим наличие заявки, служит Письмо на бланке организации-заказчика на имя руководителя ЦКП с просьбой выполнить некоторые работы. Документом, подтверждающим факт выполнения услуги, служит «Акт о выполнении услуг ЦКП ИФМ РАН». Следует отметить, что в настоящее время большой объем работ выполняется в ЦКП ИФМ РАН в рамках совместных НИР ИФМ РАН с другими научными организациями.

На этапе 4 выполнялись работы как для новых сторонних организаций - заказчиков услуг, так и для организаций, отраженных в отчете за этап 3, с которыми продолжались договорные работы. Всего на этапе 4 было 9 новых сторонних организаций - заказчиков услуг. Вместе с представленными на этапе 3 всего 17 организаций – пользователей за 2012 год, см. Приложение Б к настоящему отчету.

Более подробно данные о работах на этапах 3 и 4 представлены в «Справке о числе организаций-пользователей научным оборудованием ЦКП», Приложение 18.6, где приведен список выполненных работ. Как указано ранее, работы для сторонних организаций различаются по типу оформления:

- 1) договора на возмездной основе,
- 2) услуги по письму на безвозмездной основе,
- 3) совместные работы, не оформленные документами на настоящее время.

В соответствии с требованиями «Методических указаний по оформлению отчетности о достижении заданных значений индикаторов и показателей», в отчетность по индикатору И5.2.3 и в Справку, Приложение 18.6, включены только организации, работы с которыми относятся к типу 1 и 2, т.е. имеют документальное подтверждение.

Справка 18.6 показывает, что, как и на предыдущих этапах, основной объем запросов идет на сложные виды анализов с использованием уникального оборудования и опыта сотрудников ЦКП.

7.1.4 Разработка программы развития ЦКП ИФМ РАН

В ходе выполнения этапа 2 настоящего госконтракта была разработана Программа развития ЦКП ИФМ РАН. Разработка опиралась на предыдущие варианты Программы развития ЦКП ИФМ РАН, а также на «Комплекс мер по стимулированию использования оборудования центров коллективного пользования третьими лицами», утвержденный приказом Минобрнауки от 27 октября 2011 года № 2561. Программа была приведена ранее в Приложении А к Отчету по НИР за этап 2.

За основу взята Программа развития ЦКП ИФМ РАН, разработанная в 2008 году в рамках выполнения ГК 02.552.11.7015. Часть из пунктов старой программы, отражающих специфику ЦКП ИФМ РАН, не утратили своей актуальности и введены в новую редакцию. К таким, например, относятся «расширение прямого доступа к приборам для сотрудников ИФМ РАН, аспирантов и дипломников», раздел 5, пункт 2, «проведение лабораторных работ для студентов и аспирантов на оборудовании ЦКП», раздел 6 пункт 4. Эти пункты важны тем, что прямой доступ и выполнение лабораторных работ повышают полезную загрузку оборудования, а с другой стороны, способствуют расширению круга потребителей услуг ЦКП. При выполнении этих работ приходится иметь в виду тот факт, что оборудование, к которому разрешен прямой доступ, должно обладать повышенной устойчивостью к ошибочным действиям оператора, и далеко не все приборы выдерживают такой режим работ.

Кроме специфических для ЦКП ИФМ РАН пунктов в Программу включены положения, общие для всех ЦКП. Ряд формулировок взят из «Комплекса мер по стимулированию использования оборудования центров коллективного пользования третьими лицами», утвержденного приказом Минобрнауки от 27 октября 2011 года № 2561. Это актуализация Перечня услуг ЦКП, заключение долгосрочных договоров на услуги, поддержка и обновление интернет-сайта ЦКП, освещение в средствах массовой информации сведений о ЦКП и другие.

7.2 Исследования по формированию диодов с пониженной высотой барьера и детекторных структур на их основе

В настоящем подразделе в кратком виде приводятся результаты, полученные в этом направлении на предыдущих этапах НИР. Был, в частности, выполнен аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках НИР, в том числе обзор научных информационных источников: статьи в ведущих зарубежных и российских научных журналах, монографии и патенты - всего 33 научно-информационных источников за период 2000 – 2010 гг., см. отчет по этапу 1. Обзор современного состояния исследований показал актуальность тематики, направленной на создание устройств для приема и генерации электромагнитного излучения в терагерцовой области частот. Далее последовательно были решены теоретические вопросы задачи о движении носителей заряда в этих диодах, см. п. 7.2.1, отработаны лабораторные технологии металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ), обеспечивающая формирование низкобарьерных контактов металл-полупроводник, и формирование планарных диодов на основе низкобарьерных контактов, п. 7.2.2. Кроме того, проведено исследование характеристик планарного детектора, подтвердившее достижение заявленных характеристик, п. 7.2.3.

7.2.1 Теоретическая модель высокочастотного отклика микроструктур, учитывающая нестационарные и пролётные эффекты электронного транспорта в низкобарьерных диодах

Сложность строения низкобарьерных диодов не позволяет получить надежные аналитические решения задачи о движении носителей заряда в этих диодах. Однако без такого описания невозможна оптимизация строения диода, поэтому в настоящей работе проводилось численное моделирование движения носителей. Было проведено численное моделирование электронного транспорта в низкобарьерном диоде Мотта. Основой этих работ послужили подходы, разработанные ранее в диссертации [1]. Полное описание результатов приведено в отчете по этапу 1 настоящего госконтракта. Основные результаты состоят в следующем:

- Предложена оригинальная схема метода Монте-Карло, которая позволяет моделировать одновременно как процессы, происходящие в объеме полупроводника, так и контактные явления. Используются граничные условия, позволяющие исключить из рассмотрения область подложки, что существенно повысило эффективность метода за счет снижения объемов вычислений. Это дает возможность проводить моделирование процессов в низкобарьерных диодах Мотта за время, приемлемое для проектирования указанных приборов.
- Проведен сопоставительный анализ результатов моделирования токопереноса методом Монте-Карло и с использованием аналитического локально-полевого подхода. Обсуждены различные эффекты.
- Показано, что для диодов с тонким i слоем (100 нм) локально-полевой подход неприменим в диапазоне напряжений, при которых распределение потенциала в полупроводнике становится немонотонным.
- Проведено сравнение расчетных ВАХ с экспериментальной зависимостью. Расчет сделанный методом Монте-Карло демонстрирует хорошее совпадение с экспериментом при всех напряжениях, при которых потенциальную яму в i слое вблизи туннельного барьера можно считать классической.
- Продемонстрировано влияние диаграммы направленности электронов, инжектированных из подложки в i слой, на энергетическое распределение электронов туннелировавших в металл. Этот эффект дает дополнительную возможность управления эффективной высотой низкобарьерного диода Мотта.

Результаты по модификации высоты барьера в диодах Шоттки при использовании сильно легированных 3D- и 2D-слоев опубликованы в журнале «Физика и техника полупроводников»,

2012, том 46, вып. 11, с. 1384-1387, авторы А.В. Мурель, А.В. Новиков, В.И. Шашкин, Д.В. Юрасов.

7.2.2 Лабораторные технологии формирования низкобарьерных контактов металл-полупроводник и формирования планарных диодов на их основе

Способом снижения эффективной высоты барьера контакта МП является обеспечение высокой туннельной прозрачности вблизи вершины потенциального барьера при сильном неоднородном легировании полупроводника вблизи контакта с металлом, однако это требует использования современных ростовых технологий. Особенностью используемой в настоящем проекте технологии является непрерывный процесс внутри одного реактора. Легированный кремнием тонкий δ -слой и верхний слой металла (алюминий) наносятся в реакторе металлоорганической газофазной эпитаксии за счет подачи газов-источников и их разложения над нагретой подложкой, используя в качестве источника алюминия металлоорганическое соединение - диметилэтиламиноалан [20]. Благодаря относительно невысокому уровню δ -легирования вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов соответствовали обобщенной теории токопереноса [21] даже при минимальных значениях $\Delta \sim 0,14$ эВ. Это обеспечивает высокое качество гетеропереходов. Описание лабораторной технологии формирования низкобарьерных контактов приведено в Приложении Е к настоящему отчету.

На базе этих структур были изготовлены планарные диоды с площадью анода $8 \div 12$ $\mu\text{м}^2$. Лабораторная технология формирования диодов описана в Приложении Ж. На рисунке 7.1а схематично показано поперечное сечение планарного диода. Микрофотография планарного диода, дающая представление о его размерах и геометрии выводов, приведена на рисунке 7.1б.

Проведены эксперименты по преобразованию сигнала диапазона 94 ГГц вниз по частоте в планарном смесителе на основе модифицированной щелевой антенны с интегрированным в неё низкобарьерным диодом Мотта. Щелевая антенна имеет хорошее согласование с диодом, если его дифференциальное сопротивление заметно превосходит 1 кОм. На выходе смесителя использовались цепи, трансформирующие импеданс диода и замыкающие его по постоянному току. Были апробированы две схемы, которые обеспечивали согласование на промежуточной частоте при условии, что эквивалентное сопротивление диода под действием мощного сигнала гетеродина снижается до 2,2 или 1 кОм.

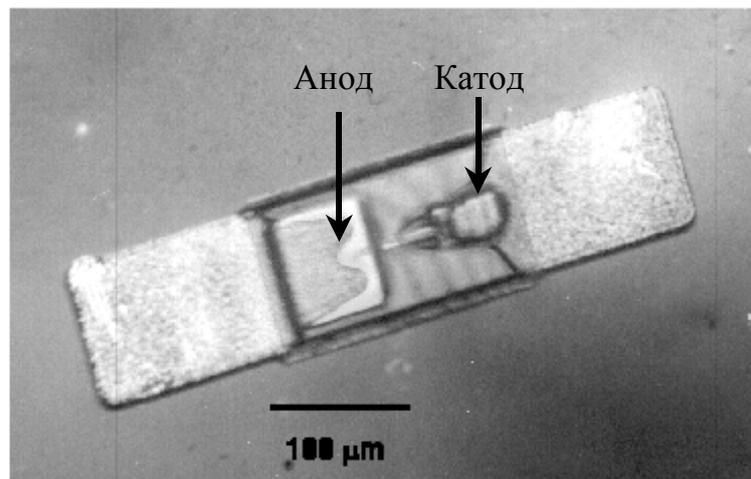
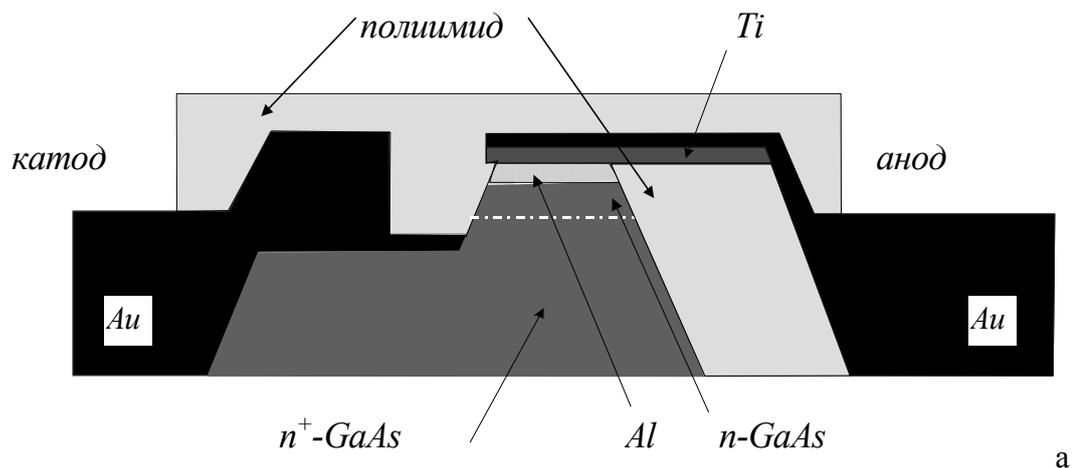


Рисунок 7.1. Схема поперечного сечения планарного диода плоскостью, проходящей через анодный контакт - а. Микрофотография низкобарьерного диода - б.

Для низкобарьерных диодов Мотта с дифференциальными сопротивлениями при нулевом смещении в диапазоне $R_j=3\div 9$ кОм величины потерь преобразования составили 16-12,5 дБ при мощности гетеродина 10-40 мкВт, соответственно. Измеренные минимальные потери преобразования примерно на 6-7 дБ уступают лучшим параметрам смесителей на обычных ДБШ в трехмиллиметровом диапазоне длин волн. Преимущество применения низкобарьерных диодов для смешения состоит в малой требуемой мощности гетеродина (40 мкВт), что примерно на 20 дБ меньше стандартной величины. Полученные результаты сопоставимы с лучшими для квазиоптических планарных смесителей на низкобарьерных диодах Шоттки на InGaAs ($L\cong 12$ дБ при $P_r\cong 51$ мкВт) [7] и показывают возможность дальнейшего снижения мощности гетеродина (до 10 мкВт) при относительно небольшом увеличении потерь преобразования (до 16 дБ). Дополнительным преимуществом разработанной конструкции планарного смесителя является относительная простота, отсутствие цепей смещения и фокусирующих линз, что даёт возможность компактного расположения приёмных антенн в плоскости при их относительно слабом

взаимовлиянии. Все перечисленные выше результаты показывают, что созданные диоды с контактами площадью не более 10 мкм^2 , эффективной высотой барьеров в диапазоне $0,1 \dots 0,3 \text{ эВ}$ перспективны для использования в системах радиовидения на частотах более 1 ТГц .

7.2.3 Исследование характеристик планарного детектора

В предыдущем подразделе были приведены результаты экспериментов по преобразованию сигнала диапазона 94 ГГц вниз по частоте в планарном смесителе на основе модифицированной щелевой антенны с интегрированным в неё низкобарьерным диодом Мотта. Было показано, что для низкобарьерных диодов Мотта с дифференциальными сопротивлениями при нулевом смещении в диапазоне $R_j=3 \div 9 \text{ кОм}$ величины потерь преобразования составили $16-12,5 \text{ дБ}$ при мощности гетеродина $10-40 \text{ мкВт}$, соответственно. В данном разделе приведены результаты дальнейших исследований характеристик планарного детектора, где низкобарьерный диод включается непосредственно в планарную антенну [22]. Важной задачей является оптимизация параметров низкобарьерных диодов для повышения чувствительности планарных детекторов. Для обеспечения высокой чувствительности при детектировании используются низкобарьерные диоды, работающие без постоянного смещения. Это упрощает конструкцию детектора и приводит к снижению уровня шумов ($1/f$ и др.) из-за отсутствия постоянного тока. Важным обстоятельством является то, что в низкобарьерных диодах Мотта ширина области обеднения может быть $\geq 0,1 \text{ мкм}$, что обеспечивает более низкие значения удельной ёмкости контакта $\leq 1 \text{ фФ/мкм}^2$ по сравнению с диодами на эффекте межзонного туннелирования [23]. Характерные значения параметров: площадь анодного контакта около 8 мкм^2 , ёмкость перехода $C \approx 7 \div 10 \text{ фФ}$, сопротивление растекания $r < 20 \text{ Ом}$. Для оптимизации режимов детектирования были использованы диоды с различной эффективной высотой барьера Δ в диапазоне примерно $0,14 \div 0,38 \text{ эВ}$, имеющие дифференциальное сопротивление при нулевом смещении в диапазоне $R_d=0,4 \div 1000 \text{ кОм}$.

Имея в виду простоту и технологичность изготовления, требованию достаточно высокого сопротивления $R_a \cong 1/(r \cdot (\omega C)^2) \approx 1 \text{ кОм}$ удовлетворяют щелевые планарные антенны, расположенные над металлизированной плоскостью [24]. Прототипом конструкции является резонансная щелевая антенна [6], представляющая собой щель длиной $\lambda/2$ в металлическом экране, где λ - длина волны излучения. Щель обладает входным сопротивлением около 1 кОм на резонансной частоте. Металлические поверхности, в которых прорезаны щели, имеют ограниченные размеры, поэтому формулы, полученные для расчета диаграммы направленности (ДН) на основе принципа двойственности, для них не применимы [25]. В плоскости Н (параллельно оси щели) ДН мало зависит от размеров металлической поверхности (вдоль щели излучение отсутствует), и в первом приближении остается такой же, как для бесконечного экрана.

Для расчета ДН в плоскости Е необходимо использовать строгие методы, основанные на решении соответствующих задач дифракции [25].

Для щелевых антенн в микрополосковом исполнении расчеты были выполнены, в основном, для металлической поверхности на бесконечном слое диэлектрика [26]. Решена задача для щелевой антенны на диэлектрике с дополнительной экранирующей поверхностью [25]. Было установлено, что эффективность простых полосковых щелевых антенн, как и простых вибраторных антенн, резко падает с увеличением толщины и диэлектрической проницаемости диэлектрика, за счет потерь на возбуждение поверхностных волн в слое диэлектрика [26]. Был сделан вывод, что полосковые антенны в щелевом исполнении не имеют преимуществ по сравнению с обычными вибраторными антеннами [24]. Вместе с этим, прямоугольные полосковые антенны, которые в ряде случаев можно рассматривать как щелевые, были широко исследованы [25]. Для улучшения характеристик в их конструкцию были введены экранные стенки и экранирующие штыри. Были достигнуты высокая эффективность и слабое взаимное влияние близко расположенных антенн [25]. Основным недостатком прямоугольных полосковых антенн было то, что прямоугольная антенна возбуждается от коаксиальной линии штырем. Монтаж диода на штырь, который находится внутри антенны, и введение дополнительных микрополосковых элементов для согласования диода и прямоугольной антенны является трудной задачей. По этой причине прямоугольные антенны были отклонены и проведена модернизация щелевой антенны, которая позволила реализовать ряд преимуществ по сравнению с простыми полосковыми вибраторными антеннами. Главное отличие от стандартных щелевых антенн состоит в том, что антенна располагается на слое диэлектрика ограниченных размеров, так что подавлено возбуждение поверхностных волн на резонансной частоте. Одностороннюю направленность антенны обеспечивает металлический экран на обратной стороне диэлектрического слоя. Площадь металлизации антенны имеет размеры примерно равные $\lambda^* \cdot \lambda^*$ (λ^* - эффективная длина волны для границы воздух-диэлектрик). Дополнительные две узкие щели разделяют металлическую поверхность антенны, но резонанс основной щели при этом сохраняется.

Для изготовления антенн были выбраны диэлектрические пластины «Rodgers 5880» (толщина - 500 мкм, диэлектрическая проницаемость $\epsilon \approx 2,2$), металлизированные с обеих сторон слоями меди толщиной 9 мкм. Для формирования рисунка использовалась фотолитография. Дополнительно на медь электролитически осаждался слой никеля для последующего монтажа диодов с помощью проводящего клея. Диоды монтировались в центральной части антенны к её металлическим лепесткам. Сигнал с диода снимался с разделенной металлической поверхности щелевой антенны тонкими проводами. Диэлектрический слой имел размеры менее $3\lambda^*/2 \times 3\lambda^*/2$, но его боковые стороны не были металлизированы. Схематическое изображение антенны представлено на рисунке 4.2 вместе с типичными диаграммами направленности, которые были

измерены в режиме детектирования при приеме излучения на резонансной частоте 94 ГГц. Ширины диаграммы направленности по половине мощности в главных плоскостях почти равны (приблизительно 40° и 45°). В Н-плоскости побочные лепестки меньше, чем в Е-плоскости. Величина побочных лепестков в Е-плоскости зависит от размеров диэлектрического слоя. Было установлено, на величину побочных лепестков влияет способ монтажа антенн. Антенны паялись на металлический экран припоем, толщина которого была несколько больше толщины обратного слоя металлизации, что приводило к уменьшению побочных лепестков. Измеренные ДН антенн (см. рисунок 4.2) имеют главный лепесток и небольшие побочные лепестки. В этом проявляется основное отличие результатов моделирования и эксперимента, очевидно связанное с различными граничными условиями на торцах диэлектрического слоя.

Измерения чувствительности планарных детекторов в зависимости от частоты показали, что их полоса составляет около 8 ГГц по уровню -3 дБ. Чувствительность падает вне полосы из-за рассогласования импеданса антенны и диода, а также из-за изменений в ДН антенны.

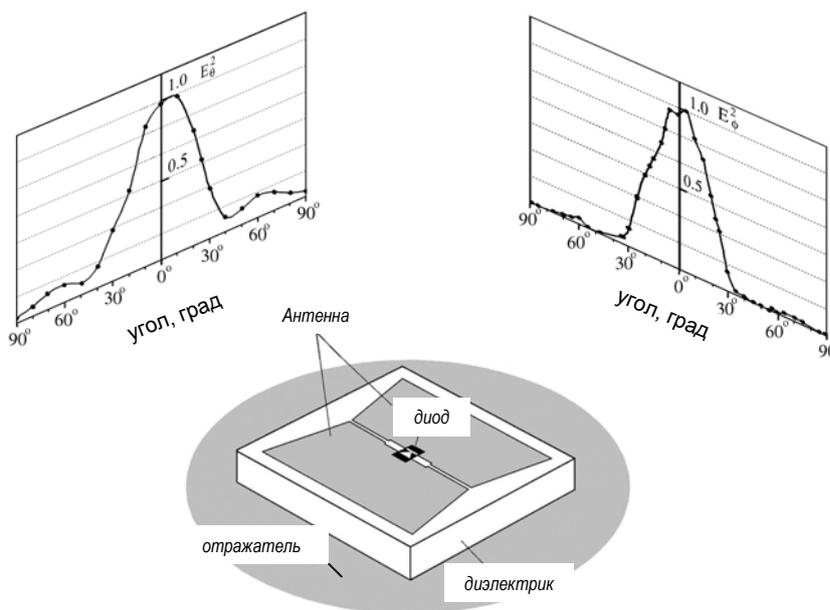


Рисунок 7.2 Схема одиночного планарного детектора и его диаграммы направленности в главных плоскостях.

В результате исследования была получена модифицированная планарная щелевая антенна, согласованная с низкобарьерными диодами Мотта и обладающая достаточной направленностью на резонансной частоте. Показана возможность подавления бокового излучения, вызванного возбуждением поверхностных волн, при ограничении размеров диэлектрического слоя в плоскости.

Проведённые измерения ДН антенны с диодом позволили оценить мощность P_r , принимаемую планарным детектором. Она определяется из измеренной диаграммы

направленности планарного детектора и известных параметров передающего рупора, по формуле передачи мощности [27]:

$$P_r = \frac{G_r \cdot G_t \cdot \lambda^2 \cdot P_t}{(4\pi l)^2}, \quad (2)$$

где G_r – коэффициент усиления антенны детектора, G_t – коэффициент усиления рупора, l – расстояние между рупором и приёмной антенной, P_t – мощность генератора, λ – длина волны излучения. Коэффициент усиления $G_r = D_o \cdot K$, где K – коэффициент неидеальности антенны, учитывающий потери мощности, D_o – направленность антенны. Направленность антенны определяется через эффективную площадь антенны на основании известного соотношения [28]:

$$D_o = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda^2} \cdot S, \quad (3)$$

где S – эффективная площадь антенны. Для планарной антенны площадь приёма рассчитывается как для эллипса с длинами полуосей, определёнными следующими выражениями [28]:

$$a = \frac{\lambda \cdot 360}{4 \cdot \theta_o \cdot \pi}, \quad (4a)$$

$$b = \frac{\lambda \cdot 360}{4 \cdot \phi_o \cdot \pi}, \quad (4б)$$

где ϕ_o и θ_o – углы раскрытия диаграммы направленности антенны в градусах. Оба угла раскрытия антенны были определены путем интегрирования ДН в главных плоскостях и деления на максимальное значение ДН. Полученные значения $\theta_o=50^\circ$ и $\phi_o=44^\circ$ несколько больше, чем углы, соответствующие половине мощности, поскольку в расчёте учитывается явный вид ДН. Полагая коэффициент неидеальности $K=1$, коэффициент усиления антенны был оценён из (3): $G_r \approx 14,5$.

Для оптимизации детекторов по чувствительности в антенны были включены диоды одинаковой конструкции, но с разной эффективной высотой барьеров. Для диодов были проведены детальные исследования статических транспортных характеристик: измерены значения коэффициента нелинейности α и сопротивления барьера R_d при нулевом смещении. Экспериментальные данные представлены на рисунке 7.3 точками, линия соответствует интерполяции экспериментальных данных. Видно, что при уменьшении R_d от 1000 до 0,4 кОм величина α монотонно уменьшается примерно от 33 до 9 А/Вт.

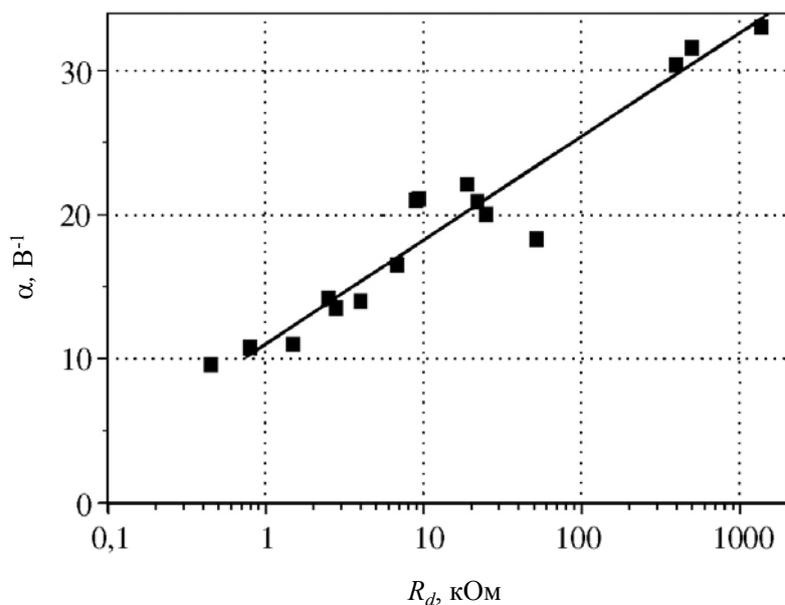


Рисунок 7.3 Коэффициент нелинейности низкочастотного диода Мотта в зависимости от дифференциального сопротивления.

Для всех детекторов были определены значения вольт-ваттной чувствительности γ . На рисунке 7.4а точками представлены результаты для γ в зависимости от дифференциального сопротивления диодов.

Аппроксимация зависимости вольт-ваттной чувствительности γ от R_d , показана на графике сплошной линией. Используются значения $R_a=800$ Ом, $R_l=500$ кОм, $C=15$ фФ, $r=10$ Ом и линейная аппроксимация зависимости $\alpha(R_d)$, представленная на рисунке 7.3. Разброс экспериментальных данных вызван погрешностью измерений и отклонением реальных параметров диодов (C , r , и α) и антенны от средних значений. Величина γ имеет тенденцию расти с увеличением R_d до тех пор, пока несущественно влияние нагрузочного сопротивления R_l .

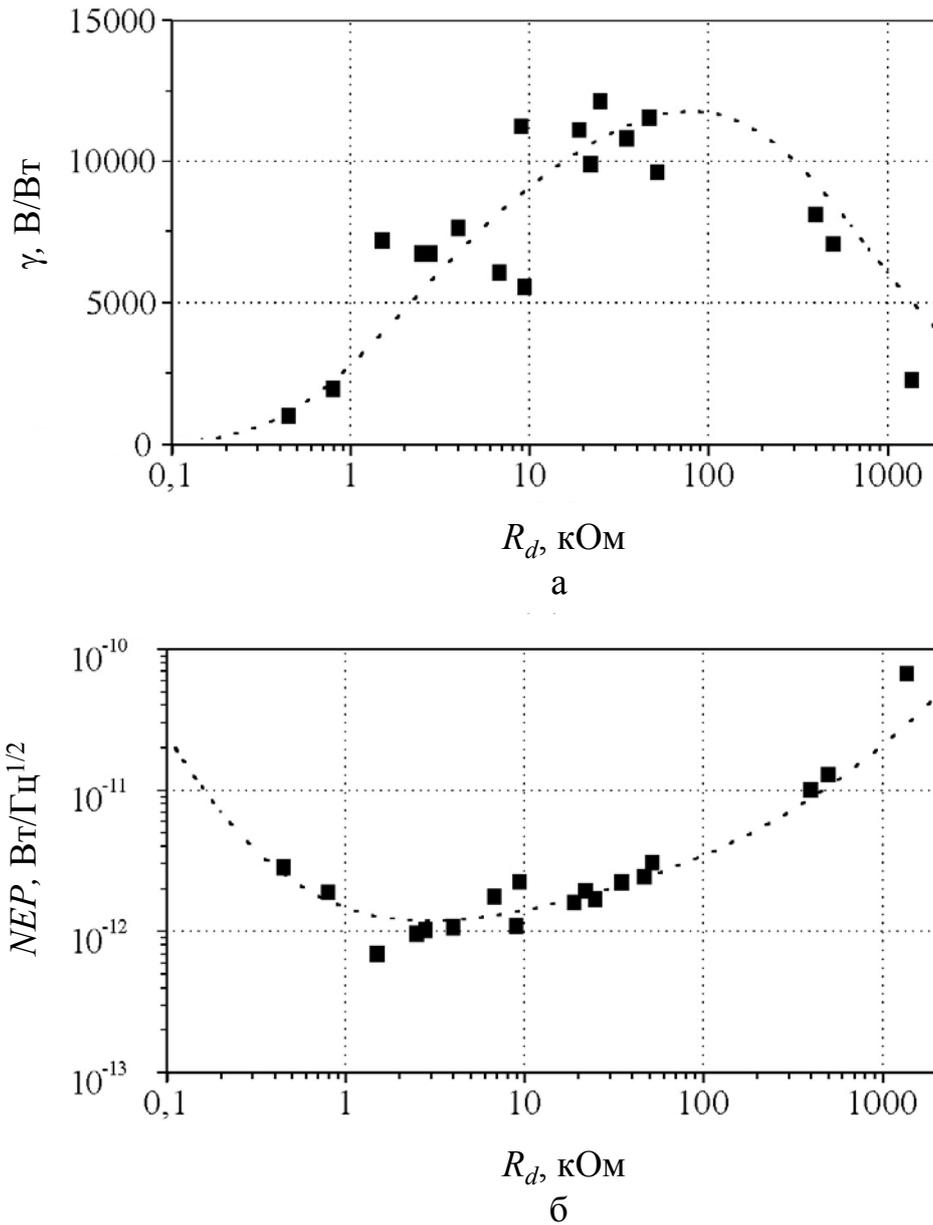


Рисунок 7.4 Измеренные зависимости вольт-ваттной чувствительности (а) и NEP (б) детекторов от их сопротивления при нулевом напряжении смещения.

При соизмеримых значениях сопротивлений наблюдается падение γ . С учетом введённой зависимости $\alpha(R_d)$ максимальные значения $\gamma > 10000$ В/Вт достигаются при $R_d = 20 \div 100$ кОм.

Зависимость $\gamma(R_d)$ позволяют оценить величину пороговой мощности детектора NEP . Расчётные значения пороговой мощности NEP и аппроксимация её зависимости от R_d представлены на рисунке 7.4б. Видно, что лучшие значения $NEP \approx 10^{-12}$ Вт Гц^{-1/2} достигаются для диодов с $R_d = 2 \div 6$ кОм. Расчёт предсказывает возрастание NEP при дальнейшем уменьшении R_d , что связано с быстрым уменьшением γ .

Проведённые исследования показывают путь достижения высокой чувствительности в планарных детекторах миллиметрового диапазона. Полученные экспериментальные данные по детектированию в окрестности 94 ГГц отвечают теоретическим оценкам. Измеренные значения γ и оценка возможных значений NEP для этого диапазона соответствуют или превосходят известные результаты для других низкобарьерных диодов [29,30].

Таким образом, определены значения вольт-ваттной чувствительности γ и пороговой мощности NEP планарного детектора, где низкобарьерный диод включается непосредственно в планарную антенну. Получены максимальные значения γ более 10000 В/Вт, лучшие значения $NEP \approx 10^{-12}$ Вт Гц^{-1/2}.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы, запланированные на этап 4 и работу в целом по госконтракту №16.552.11.7007 от "29" апреля 2011г. по теме "Развитие центром коллективного пользования научным оборудованием комплексных исследований в области формирования и исследования многослойных наноструктур на основе Si, GaAs и GaN для пассивных и активных элементов нанoeлектроники и нанофотоники миллиметрового и инфракрасного диапазонов длин волн", выполнены.

На этапе 4 выполнены запланированные работы по развитию Центра коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур». Закупленное в рамках темы спецоборудование (Вакуумная установка резистивного и электронно-лучевого испарения с холловским ионным источником Amod 206 производства компании Angstrom Engineering; Генератор сигналов Agilent Technologies E8257D и Станция ожижения гелия Cryomech LHeP18 с системой сбора газообразного гелия с системой сбора газообразного гелия) прошло этап пуско-наладочных работ и успешно введено в эксплуатацию.

Выполнены запланированные на этап 4 научные исследования. Определены значения вольт-ваттной чувствительности γ и пороговой мощности NEP планарного детектора, где низкобарьерный диод включается непосредственно в планарную антенну. Получены максимальные значения γ более 10000 В/Вт, лучшие значения NEP составили 10^{-12} Вт Гц^{-1/2}.

Исследованы параметры экспериментальной системы радиовидения миллиметрового диапазона длин волн. В составе системы визуализации использована линейка планарных детекторов. Линейка состояла из восьми элементов, расположенных в ряд с периодом полторы длины волны. Для регистрации картины поля линейка детекторов механически перемещалась в плоскости по двум ортогональным направлениям. Эксперимент показал, что при просвечивании излучением с частотой 94 ГГц достигнутая величина пространственного разрешения не хуже 3λ .

Выполнены исследования в области рентгеновской литографии. Показано, что малогабаритные, относительно маломощные (мощность лазерного излучения менее 10 Вт) твердотельные лазеры могут применяться в качестве эффективных источников ЭУФ излучения в составе установок проекционной ЭУФ литографии, решающих исследовательские задачи.

В целом по НИР полностью выполнены запланированные на этапы 1 – 4 научные исследования и работы по развитию Центра коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур».

Закупленное в рамках темы спецоборудование прошло этап пуско-наладочных работ и успешно введено в эксплуатацию. Это рентгеновский дифрактометр Bruker D8 Discover, генератор сигналов Agilent Technologies E8257D, атомно-силовой микроскоп Ntegra Prima, лазерный генератор микро-изображений μ PG101, вакуумные установки СММ-2000 и Amod 206, станция

ожигения гелия Cryomech LHeP18 с системой сбора газообразного гелия, центрифуга для нанесения фоторезиста SPIN-1200D.

Объем средств, направленных на закупку оборудования составил 89% от выделенных на тему средств федерального бюджета. Проведенные закупки лучших мировых образцов оборудования существенно расширили технические возможности ЦКП ИФМ РАН, создав предпосылки для успешного выполнения исследований в области микро- и наноструктур как в базовом Институте физики микроструктур, так и на предприятиях региона, для которых ЦКП ИФМ РАН постоянно выполняет заказы.

В ходе выполнения НИР проведены разнообразные исследования в интересах сторонних организаций. Разработаны новые методики исследований, введены новые виды услуг, обновлен сайт ЦКП и Перечень услуг ЦКП ИФМ РАН.

В результате теоретических исследований по низкобарьерным полупроводниковым диодам методами численного моделирования изучены процессы электронного транспорта в низкобарьерном диоде Мотта. Предложена методика выращивания структур для низкобарьерных диодов на основе GaAs в едином процессе газофазной эпитаксии. Созданы новые методики исследования структур с дельта-слоями и изготовленных на их основе низкобарьерных диодов. С их помощью выполнены экспериментальные исследования тестовых структур. Представлены результаты исследований по системе радиовидения 3-мм диапазона длин волн на основе диодов с пониженной высотой барьера. Экспериментально измерены значения вольт-ваттной чувствительности γ и пороговой мощности NEP планарного детектора, где низкобарьерный диод включается непосредственно в планарную антенну. Получены максимальные значения γ более 10000 В/Вт, лучшие значения NEP составили 10^{-12} Вт Гц^{-1/2}.

В области рентгеновской литографии выполнены работы по лазерно-плазменному источнику излучения, отражательной маске и системе освещения маски ЭУФ нанолитографа на рабочей длине волны $\lambda=13,5$ нм. Продемонстрированы литографические изображения в резистах, полученные с помощью метода проекционной литографии на длине волны 13,5 нм. Применительно к изучению супергладких подложек для многослойной рентгеновской оптики нанолитографа с рабочей длиной волны $\lambda=13,5$ нм показано, что наибольшей адекватностью обладает метод зеркального отражения.

Запланированные в ТЗ и КП на этапе 4 и в целом по НИР значения индикаторов и показателей Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» были достигнуты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Шашкин В. И. Нелинейные транспортные эффекты в селективно легированных гетероэпитаксиальных микроструктурах металл-полупроводник. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Нижний Новгород, 2009 г.
- 2 E.R. Brown. A system-level analysis of Schottky diodes for incoherent THz imaging arrays. *Solid-State Electronics*, v.48, 2051 (2004).
- 3 S. Sassen, B. Witzigmann, C. Wolk, H. Brugger. Barrier height engineering on GaAs THz Schottky diodes by means of high-low doping, InGaAs- and InGaP-layers. *IEEE Transaction on Electron.Devices*, v.47, 24 (2000).
- 4 M.J. Kearney, and I. Dale. GaAs planar doped barrier diodes for mixer and detector applications. *GEC J. Res.*, v.8, N1, 1 (1990).
- 5 Zhirun Hu, Van Tuyen Vo, and Ali A. Rezazadeh. High Tangential Signal Sensitivity GaAs Planar Doped Barrier Diodes for Microwave/Millimeter-Wave Power Detector Applications. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, v. 15, N3, 150 (2005).
- 6 R.G. Meyers, P. Fay, J.N. Schulman, et al. Bias and temperature dependence of Sb-based heterostructure millimeter-wave detectors with improved sensitivity. *IEEE Electron Devices Letters*, v. 25, N1, 4 (2004).
- 7 P. Chahal, F. Morris, and G. Frazier. Zero bias resonant tunnel Schottky contact diode for wide-band direct detection. *IEEE Electron Device Letters*, v.26, N12, 894 (2005).
- 8 A.C. Young, J.D. Zimmerman, E.R. Brown, and A.C. Gossard. Semimetal-semiconductor rectifiers for sensitive room-temperature microwave detectors. *Appl. Phys. Lett.* v. 87, 163506 (2005).
- 9 E.R. Brown. Fundamentals of terrestrial millimeter-wave and THz remote sensing. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, v.13, N 4, 995 (2003).
- 10 G. P. Gauthier, W. Y. Ali-Ahmad, T. P. Budka et al. A uniplanar 90-GHz Schottky-diode millimeter-wave receiver. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v.43, N 7, 1669 (1995).
- 11 Волгунов Д.Г., Забродин И.Г., Закалов А.Б. и др. Стенд проекционного ЭУФ-наноитографа-мультипликатора с расчетным разрешением 30 нм // Известия РАН. Серия физическая. 2011. Т.75. №1. С.54.
- 12 Бибишкин М.С., Забродин И.Г., Каськов И.А. и др. Двухзеркальный рефлектометр для относительных измерений коэффициентов отражения многослойных зеркал на длине волны 13.5 нм // Известия академии наук. Серия физическая. 2004. Т.68. №4. С.560.
- 13 Loyen L.A., Bottger T., Braun S. et al. A new laboratory EUV reflectometer for large optics using a laser plasma source // *Proc. SPIE*. 2003. V.5038. P.12.

- 14 Зуев С.Ю., Пестов А.Е., Полковников В.Н. и др. Система освещения маски ЭУФ-нанолиитографа // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2011. №6. С. 10.
- 15 Endo A. / CO₂ laser produced tin plasma light source as the solution for EUV lithography // Lithography Facilities, Lithography, Michael Wang (Ed.), ISBN: 978-953-307-064-3, INTECH (2010). P. 161.
- 16 Бибишкин М.С., Забродин, И.Г., Зуев С.Ю. и др. Рефлектометрия в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом диапазонах // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. №1. 2003. С. 70.
- 17 International Radiation Detectors, Inc. AXUV Photodiodes with Directly Deposited Filters <http://www.ird-inc.com/axuvwdd/axuvwdd.html>
- 18 Забродин И.Г., Закалов Б.А., Зуев С.Ю. и др. Абсолютно калиброванный измеритель ЭУФ-мощности для аттестации источников излучения на 13.5 нм // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2007. №6. С.104.
- 19 Schürmann M.Ch., Missalla T., Mann K. et al. Metrology tools for EUVL-source characterization and optimization // Proc. SPIE. 2003. V. 5037. P.378.
- 20 Shashkin V. Microstructure and Properties of Aluminum Contacts Formed on GaAs(100) by Low Pressure Chemical Vapor Deposition with Dimethylethylamine Alane Source / V. Shashkin, S. Rushworth, V. Daniltsev, A. Murel, Yu. Drozdov, S. Gusev, O. Khrykin, N. Vostokov // Journal of Electronic Materials. – 2001. – V. 30. – N 8. – P. 980-986.
- 21 Шашкин В.И. Обобщённая теория токопереноса в низкобарьерных диодах Мотта с приповерхностным дельталегированием: сопоставление с экспериментом / В.И. Шашкин, А.В. Мурель // Микроэлектроника, - 2010. - Т. 39. - №5. С.1-7.
- 22 Шашкин В.И. Микроволновые детекторы на основе низкобарьерных планарных диодов Шоттки и их характеристики / В.И. Шашкин, В.Л. Вакс, В.М. Данильцев, А.В. Масловский, А.В. Мурель, С.Д. Никифоров, Ю.И. Чеченин // Известия вузов. Радиофизика. – 2005. - Т. 48. - № 6. - С. 544-551.
- 23 Meyers R.G. Bias and temperature dependence of Sb-based heterostructure millimeter-wave detectors with improved sensitivity / R.G. Meyers, P. Fay, J.N. Schulman, S. Thomas III, D.H. Chow, J. Zink, Y.K. Voegeman, P. Deelman // IEEE Electron Devices Letters. – 2004. - V. 25. - P. 4–6.
- 24 Панченко Б.А. Микрополосковые антенны / Б.А. Панченко, Е.И. Нефедов // М.: Радио и связь. 1986. - 144 С.
- 25 Кочержевский Г.Н. Антенно-фидерные устройства / Г.Н. Кочержевский // М.: Радио и связь. - 1981. - 280 С.

- 26 Iounevich E.O. Antenna-coupled Schottky diodes for millimeter wave receiver // E.O. Iounevich, V.E. Lioubtchenko // MSMW 98 Symposium Proceedings, Kharkov, Ukraine. September 15-17. - 1988. - P. 152.
- 27 Balanis C.A. Antenna theory. Analysis and design / C.A. Balanis // John Wiley and Sons. - 1982. - 791 P.
- 28 Айзенберг Г.З. Антенны ультракоротких волн / Г.З. Айзенберг // М.: 1957. - 698 С.
- 29 Schulman J.N. W-band direct detection circuit performance with Sb-heterostructure diodes // J.N. Schulman, V. Kolinko, M. Morgan, C. Martin, J. Lovberg, S. Thomas III, J. Zinck, Y.K. Boegeman // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. - 2004. - V. 14. – NO. 7. - P. 316-318.
- 30 Woolard D.L. Terahertz Frequency Sensing and Imaging: A Time of Reckoning Future Applications? / D.L. Woolard, E.R. Brown, M. Pepper, and M. Kemp // Proceedings of the IEEE. – 2005. – V. 93. – NO. 10. – P. 1722-1743.

Приложение А

к отчету о НИР «Развитие центром коллективного пользования научным оборудованием комплексных исследований в области формирования и исследования многослойных наноструктур на основе Si, GaAs и GaN для пассивных и активных элементов нанoeлектроники и нанофотоники миллиметрового и инфракрасного диапазонов длин волн». Этап 4. Обобщение и оценка результатов исследований

Перечень организаций – заказчиков исследований в ЦКП ИФМ РАН

На этапе 4 организациями – заказчиками, новыми по сравнению с этапом 3, были:

1. ООО «Международная академическая корпорация науки и техники» 390000, Россия, г. Рязань, пр. Яблочкова, д. 5, корп. 39
2. Научно-производственная фирма «Элан-Практик» ООО 606032 г. Дзержинск Нижегородской обл., ул. Бутлерова, 51
3. ООО «Центр научного и технического развития», 603155 г. Нижний Новгород, а/я 89
4. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский радиофизический институт», 603950 г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д.25/12а
5. ООО «Квантрон-НН», 603155, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д.46
6. ООО НПП «Теос», 603022 г. Нижний Новгород, ул. Ветеринарная, д.2/18
7. ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», 603104 Нижний Новгород, ул. Тропинина, 47
8. Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского 603950 г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, ГСП-20,
9. Открытое акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Салют» (ОАО «НПП «Салют»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ларина, д. 7

Руководитель работ по контракту
зам. директора по НИР ИФМ РАН, д.ф.-м.н.

 В.И. Шашкин

«23» октября 2012 г.



Приложение Б

к отчету о НИР «Развитие центром коллективного пользования научным оборудованием комплексных исследований в области формирования и исследования многослойных наноструктур на основе Si, GaAs и GaN для пассивных и активных элементов нанoeлектроники и нанофотоники миллиметрового и инфракрасного диапазонов длин волн». Этап 4. Обобщение и оценка результатов исследований

Справка о метрологическом обеспечении измерений ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур»

В соответствии с годовыми планами ИФМ РАН постоянно проводится поверка приборов ЦКП ИФМ РАН в лабораториях Госстандарта. Это приборы измерения электрических величин, давления и дозиметрической аппаратуры рентгеновского диапазона.

Закупается современное аналитическое оборудование, сертифицированное фирмами-изготовителями. Оборудование идет в комплекте с набором методик и программным обеспечением. Из ранее закупленного сюда относятся, в частности, дифрактометры рентгеновские Philips X'Pert PRO MRD (Philips), Bruker D8 Discover, сканирующий электронный микроскоп Supra 50VP (Karl Zess), комплекс сканирующих зондовых микроскопов "Solver" (NT-MDT), комплекс фурье-спектроскопии высокого разрешения на основе BOMEM DA3.36, Фурье-спектрометр Vertex 80V (BRUKER OPTIC), комплект для СВЧ-измерений сверхпроводников на базе оборудования фирм Agilent и Tektonix. В рамках выполнения настоящего госконтракта это уже поставленные и введенные в эксплуатацию «Профилометр модели 130» и «Микроскоп зондовый сканирующий СММ-2000» с сертификатами средства измерения, аттестованные методики и контрольные образцы к ним, которые входят в комплект "Установка исследования многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур методами микроскопии в процессе плазменного напыления-перепыления с контролем шероховатости и качества их поверхности". Аттестованные образцы (Мера рельефная Кварц-ХУ1400/Z90нм и Мера профильная ПРО-10, ОАО «Завод ПРОТОН-МИЭТ») будут в дальнейшем использованы при аттестации методик измерения на других, уже имеющихся измерительных приборах ЦКП ИФМ РАН, что обеспечит существенное продвижение ЦКП в его метрологическом обеспечении.

В ЦКП ИФМ РАН постоянно ведутся работы в области метрологии по совершенствованию методов анализа с использованием оборудования ЦКП. В Отчете по НИР представлены новые разработки ЦКП ИФМ РАН, в частности, предложен простой вариант учета отклонений от линейной зависимости периода решетки и упругих модулей твердого раствора от концентрации при рентгенодифракционном анализе эпитаксиальных слоев; подобран тип кластерных ионов,

подходящих для количественного элементного послойного анализа слоистых структур в масс-спектрометре TOF.SIMS 5.

Работа ЦКП ИФМ РАН в области метрологического обеспечения измерений докладывается на научных конференциях, на специализированных метрологических конференциях, освещается в периодических научных изданиях, в том числе зарубежных. В частности, сотрудники ЦКП выступают с докладами на семинарах «Метрологическое обеспечение нанотехнологий: текущее состояние и перспективы развития», которые проводит последние годы ФБУ «Нижегородский ЦСМ». Действует Договор о сотрудничестве с Нижегородским ЦСМ.

Руководитель работ по контракту
зам. директора по НИР ИФМ РАН, д.ф.-м.н.



В.И. Шашкин

«23» октября 2012 г.



Приложение В

к отчету о НИР «Развитие центром коллективного пользования научным оборудованием комплексных исследований в области формирования и исследования многослойных наноструктур на основе Si, GaAs и GaN для пассивных и активных элементов наноэлектроники и нанофотоники миллиметрового и инфракрасного диапазонов длин волн». Этап 4. Обобщение и оценка результатов исследований

Перечень сертифицированного оборудования. Перечень аттестованных методик ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур»

Сертификаты фирм-изготовителей имеют следующие приборы:

1. Дифрактометр рентгеновский Philips X'Pert PRO MRD Philips Нидерланды 2002.
2. Дифрактометр рентгеновский Bruker D8 Discover, Германия 2011.
3. Комплекс сканирующих зондовых микроскопов "Solver" в составе микроскопов: "Solver-P47", "Smena", "Solver P7LS" и др., компания НТ-МДТ, Зеленоград, Россия 1998, 2001, 2004, 2012 годы.
4. Комплект для СВЧ-измерений, покомпонентно: Анализатор спектра Agilent E4407B, Цифровой осциллограф Tektonix TDS3000B США 2004.
5. Комплекс фурье-спектроскопии высокого разрешения на основе Фурье спектрометра WOMEM DA3.36 WOMEM. (В настоящее время ABB) Канада.
6. Фурье-спектрометр Vertex 80V BRUKER OPTIC GmbH Германия.
7. Сканирующий электронный микроскоп Supra 50VP Karl Zess Германия 2005.

Действующие Свидетельства об утверждении типа средств измерения и Свидетельства о поверке имеют следующие приборы:

1. Профилометр модели 130, ОАО «Завод ПРОТОН-МИЭТ», Свидетельство об утверждении типа средств измерения №26057, Свидетельство о поверке №203-2031.
2. Микроскоп зондовый сканирующий СММ-2000, ОАО «Завод ПРОТОН-МИЭТ», Свидетельство об утверждении типа средств измерения №42785, Свидетельство о поверке №203-185.
3. Мера профильная ПРО-10, ОАО «Завод ПРОТОН-МИЭТ», Свидетельство о поверке №203-2304.
4. Мера рельефная Кварц-ХУ1400/Z90нм. ОАО «Завод ПРОТОН-МИЭТ», Свидетельство о поверке №203-189.

В работе ЦКП используются современные методики анализа, разработанные фирмами-изготовителями аналитического оборудования и идущие в комплекте поставки оборудования.

В рамках настоящего госконтракта в комплекте поставки «Часть 1 оборудования «Высоковакуумная технологическая установка исследования многослойных Si, GaAs, GaN наноструктур методами микроскопии в процессе плазменного напыления-перепыления с контролем шероховатости поверхности» получены методики:

- Методика 1 сканирующей туннельной микроскопии Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика 2 атомно-силовой микроскопии Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика 3 сканирующей туннельной спектроскопии Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика 4 электрофизических измерений Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика 5 нанолитографии многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика 6 магнито-резонансной и магнито-статической микроскопии многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика 7 силовой модуляционной микроскопии для изучения упругости многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика 8 вискозиметрической сканирующей микроскопии для изучения вязкости многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика 9 адгезионной сканирующей микроскопии в установках для изучения адгезионной способности многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика 10 исследования многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур методами оптической и зондовой микроскопии в процессе плазменного напыления или перепыления;
- Методика 11 изучения ферромагнитных и пьезоэлектрических свойств Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика 12 микронзондовой трассирующей щуповой диагностики для полноразмерного предварительного контроля морфологических параметров многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур с точностью 10нм.

Кроме того, используются разработанные в ИФМ РАН оригинальные методики, защищённые патентами РФ или опубликованные в центральной печати:

Измерение толщины прозрачных объектов

- 1 *В.В. Иванов, Е.В. Катин, В.А. Маркелов, М.А. Новиков, А.Д. Тertyшник.*
Интерферометрическое устройство для измерения физических параметров прозрачных слоев (варианты). Патент РФ № 2141621, приоритет от 4.02.1998.
- 2 *В.В. Иванов, Е.В. Катин, В.А. Маркелов, М.А. Новиков, А.Д. Тertyшник.*
Интерферометрическое устройство для бесконтактного измерения толщины. Патент РФ № 2147728, приоритет от 10.11.1998.

Измерение нелинейного отклика сверхпроводящих слоев

- 3 *E. E. Pestov, V. V. Kurin, Yu. N. Nozdrin*, "Third-order local nonlinear microwave response of YBa₂Cu₃O₇ and Nb thin films", IEEE Trans. on Appl. Supercond. 11, 131 (2001).
- 4 *A. Yu. Aladyshkin, A. A. Andronov, E. E. Pestov et al.*, "Study of the Nonlinear Response of Superconductors in the Microwave Band Using a Local Technique", Radiophys. and Quant. Elect. 46, 109 (2003).

C-V профилирование

- 5 *И.Р. Каретникова, И.М. Нефёдов, В.И. Шашкин*. О точности восстановления профиля легирования полупроводников на основе вольт-фарадных измерений в процессе электрохимического травления. ФТП, 2001, т.35, в.7, с.801-807.
- 6 *V. Shashkin, I. Karetnikova, A. Murel, I. Nefedov, I. Shereshevskii*. Approach to electrochemical C-V profiling in semiconductor with sub-Debye-length resolution. IEEE Trans. On Electron. Devices, 2000, v.47, N6, p.1221-1224.
- 7 *В.И. Шашкин, И.Р. Каретникова, И.М. Нефедов, А.В. Мурель, И.А. Шерешевский*. Простой метод восстановления тонкой структуры легирования полупроводников из C-V измерений в электрохимической ячейке, ФТП, 1997, т.31, N8, с.926-929.
- 8 *И.В. Ирин, А.В. Мурель*. Автоматизированный измерительный комплекс для электрохимического C-V профилирования. ПТЭ, 1993, №6, с.150.

Рентгенодифракционный анализ эпитаксиальных слоев и островков

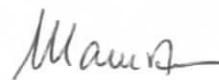
- 9 *Ю.Н. Дроздов, Л.Д. Молдавская*. Динамическое рассеяние рентгеновских лучей на многослойных эпитаксиальных структурах. В сб. "Физика твердого тела. Лаб. практикум. Методы получения твердых тел и исследование их структуры" под ред. проф. Хохлова А.Ф., Том 1. М., Высшая школа, 2001, с. 171-202.
- 10 *Дроздов Ю.Н., Ю.Н. Сафьянов*. Рентгенография высокотемпературного сверхпроводника YBa₂Cu₃O_{7-d}. Там же, стр. 131-140.
- 11 *Ю.Н. Дроздов, Л.Д. Молдавская, В.М. Данильцев, О.И. Хрыкин, А.В. Новиков, В.В. Постников*. Рентгенооптическая схема для дифракционного исследования полупроводниковых квантовых слоев и точек. Поверхность. РСНИ, 2000, 1, 136-139.
- 12 *Ю.Н. Дроздов, Л.Д. Молдавская, В.М. Данильцев, О.И. Хрыкин, А.В. Новиков, В.В. Постников, В.И. Шашкин*. Сокращенный способ рентгеновского дифракционного сканирования обратного пространства эпитаксиальных слоев и островков. Поверхность. РСНИ, 2003, №1, с.114-118.

Послойный элементный анализ

- 13 *М.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, Н.Н. Салащенко, Н.И. Полушкин, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин*. Послойный Оже-анализ сверхвысокого разрешения: проблема минимизации аппаратурных погрешностей. Письма в ЖТФ, 1995, т.21, №18, с.1-7.

- 14 М.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов, Д.В. Мастеров, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин. Сверхвысокое разрешение при послойном Оже-анализе гетероструктур InGaAs/GaAs с глубоко залегающими квантовыми ямами. Письма в ЖТФ, 1996, т.22, №18, с.61-67.
- 15 М.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин. Субнанометровое разрешение по глубине при послойном анализе с использованием скользящих Оже-электронов. Письма в ЖТФ, 2001, т.27, №3, с.59-66.
- 16 М.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин. Новый метод определения резкости гетеропереходов InGaAs/GaAs при послойном Оже-анализе. Письма в ЖТФ, 2001, т.27, №20, с.51-56.
- 17 М.Н.Дроздов, Ю.Н.Дроздов, Д.А.Пряхин, В.И.Шашкин, П.Г.Сенников, Х.-Й.Поль. Количественный безэталонный анализ концентрации изотопов $^{28,29,30}\text{Si}$ в кремнии методом ВИМС на установке TOF.SIMS-5. «Известия Российской Академии наук. Серия физическая». 2010. Т.74.№1.С.82-84.
- 18 М.Н.Дроздов, Ю.Н.Дроздов, Д.В.Мастеров, С.А.Павлов, А.Е.Парафин, Г.Л.Пахомов. Использование кластерных первичных ионов Bi^{3+} для послойного анализа ВТСИ пленок YBaCuO методом ВИМС. «Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования». 2010, №7, с.53-57.
- 19 М. Н. Дроздов, Ю. Н. Дроздов, М. М. Барышева, В. Н. Полковников, Н. И. Чхало Использование кластерных вторичных ионов для минимизации матричных эффектов при послойном анализе многослойных наноструктур La/B4C методом ВИМС. Поверхность РСНИ. вып.10, С. 14-18 (2010).
- 20 М.Н.Дроздов, Ю.Н.Дроздов, Д.Н.Лобанов, А.В.Новиков, Д.В.Юрасов Использование кластерных вторичных ионов Ge^{2-} , Ge^{3-} для повышения разрешения по глубине при послойном элементном анализе полупроводниковых гетероструктур GeSi/Si методом ВИМС. ФТП, 44, 3, 418-421 (2010).
- 21 М.Н. Дроздов, Ю. Н. Дроздов, Д. Н. Лобанов, А. В. Новиков, Д. В. Юрасов. Анализ чувствительности масс-спектрометра TOF. SIMS-5 к матричным элементам в слоях GeSi при регистрации комплексных ионов. Поверхность РСНИ. Вып.6, С. 93-96 (2011).

Руководитель работ по контракту
зам. директора по НИР ИФМ РАН, д.ф.-м.н.

 В.И. Шашкин

«23» октября 2012 г.



Приложение Г

к отчету о НИР «Развитие центром коллективного пользования научным оборудованием комплексных исследований в области формирования и исследования многослойных наноструктур на основе Si, GaAs и GaN для пассивных и активных элементов наноэлектроники и нанофотоники миллиметрового и инфракрасного диапазонов длин волн». Этап 4. Обобщение и оценка результатов исследований

Актуализированный перечень услуг ЦКП ИФМ РАН

(информация размещена на странице сайта ЦКП ИФМ РАН: <http://ipmckp.ru/ru/services>)

РЕНТГЕНО-ДИФРАКЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Определение концентрации 2-х компонентных твердых растворов и уровня остаточных упругих напряжений в эпитаксиальных слоях $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$; $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$; $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$; $\text{InAs}_{1-x}\text{P}_x$; $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ и др.
2. Определение параметров многослойных эпитаксиальных структур методом рентгеновской дифрактометрии. Толщина слоев, состав, период повторения.
3. Измерение толщины тонких слоев и шероховатости поверхности по угловым спектрам рассеяния жесткого рентгеновского излучения.
4. Определение параметров многослойных зеркал с помощью рентгеновской рефлектометрии. Толщина слоев, период повторения и дисперсия.
5. Определение отклонения среза пластины от кристаллографической плоскости.
6. Анализ эпитаксиальных слоев высокотемпературного сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$.

РЕНТГЕНО-ОПТИЧЕСКИЕ (СПЕКТРАЛЬНЫЕ) ИЗМЕРЕНИЯ

7. Измерение толщины слоев и шероховатости границ многослойных структур по угловым и спектральным зависимостям коэффициента отражения мягкого рентгеновского излучения.
8. Измерение коэффициентов отражения мягкого рентгеновского излучения с относительной точностью до 1%. для диапазона 0.6-200нм,

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ

9. Диагностика структуры тонких объектов (толщиной до ~ 100 нм) с помощью методов дифракции быстрых электронов и просвечивающей электронной микроскопии

10. Определение элементного состава объектов (количественные измерения), толщины и состава тонких пленок, построение карт распределения элементов и фаз с помощью методов энергодисперсионного рентгеновского микроанализа.
11. Диагностика тонких объектов методом спектроскопии характеристических потерь электронов (включая количественные измерения толщины и состава тонких пленок).
12. Морфометрический анализ субмикронных и нанометровых неоднородностей и частиц.
13. Сканирующая электронная микроскопия разнообразных объектов (в том числе и непроводящих) без предварительной подготовки.
14. Формирование структур на поверхности твердого тела с помощью методов электронной литографии.

СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

15. Измерение шероховатости поверхностей с негауссовым распределением по высотам.
16. Определение шероховатости подложек.
17. Реконструкция реального рельефа поверхности с учётом нелокальности взаимодействия зонд-поверхность в сканирующей туннельной микроскопии.

ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ И ТОЛЩИН

18. Интерферометрическое измерение физических параметров прозрачных слоев.
19. Интерферометрическое восстановление трехмерного изображения поверхности.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ МЕТОДОМ ВТОРИЧНО-ИОННОЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ

20. Измерение профиля распределения состава по глубине образца с высокой чувствительностью и высоким разрешением методом вторично-ионной масс-спектрометрии.

СПЕКТРОСКОПИЯ ФОТОПРОВОДИМОСТИ, ФОТО- И ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

21. Измерение концентрации кислородсодержащих термодоноров с энергией ионизации 45-69 Мэв в кремнии методом абсорбционной ИК спектроскопии.
22. Определение внешней квантовой эффективности в кремниевых светоизлучающих структурах, легированных эрбием.
23. Определение электроактивных примесей в моноизотопном кремнии.
24. Определение методом релаксационной спектроскопии электрически активных центров с глубокими уровнями в кремниевых светоизлучающих структурах, легированных эрбием.

25. Профилирование электрически активных центров с глубокими уровнями в кремниевых структурах, легированных эрбием.
26. Определение состава и ширины квантовых ям в полупроводниковых гетероструктурах методом фотолюминесценции.
27. Стационарная и время-разрешающая спектроскопия полупроводниковых структур в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн 0,2-2 мкм.

ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИЯ

28. Исследование спектров пропускания, фотопроводимости, люминесценции и стимулированного излучения полупроводниковых структур, кристаллов и диэлектрических материалов методом Фурье-спектроскопии.

ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСТРУКТУР И НЕСТАЦИОНАРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ

29. Определение профиля легирования полупроводников методом электрохимического C-V профилирования.
30. Определение высоты барьера в гетероструктурах GaAs/AlGaAs методом измерения температурных зависимостей вольтамперных характеристик.

ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ И СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СВОЙСТВ ПЛЁНОК И НАНОСТРУКТУР

31. Измерение магнитооптических параметров магнитных пленок на основе эффектов Керра и Фарадея.
32. Измерение остаточной намагниченности и распределения намагниченности в плоскости пленки, а также температурной и полевой зависимости остаточной намагниченности.
33. Измерение вольт-амперных характеристик сверхпроводящих мостиков и джозефсоновских переходов, их зависимости от температуры, напряженности магнитного поля и мощности СВЧ излучения.
34. Измерение нелинейных свойств тонких сверхпроводящих пленок и распределения нелинейных свойств и критической температуры в плоскости пленки бесконтактным методом.
35. Измерение поверхностного СВЧ сопротивления сверхпроводящих плёнок.

РАДИОСПЕКТРОСКОПИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА
ДЛИН ВОЛН

36. Спектральные исследования (абсорбция, фотопроводимость) и магнитоспектроскопия
в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн.

Руководитель работ по контракту
зам. директора по НИР ИФМ РАН, д.ф.-м.н.

Машкин В.И. Шашкин

«23» октября 2012 г.



Приложение Д

к отчету о НИР «Развитие центром коллективного пользования научным оборудованием комплексных исследований в области формирования и исследования многослойных наноструктур на основе Si, GaAs и GaN для пассивных и активных элементов нанoeлектроники и нанofотоники миллиметрового и инфракрасного диапазонов длин волн». Этап 4. Обобщение и оценка результатов исследований

Перечень закупленного оборудования

Таблица Д.1 Спецоборудование, приобретенное в рамках госконтракта

№	Наименование и марка	Фирма и страна-производитель	Номер накладной и дата поставки	Стоимость комплекта, млн. руб.
1.	Источник бесперебойного питания Smart-UPS VT 30kVA	Корея	№175 21.07.2011	0,46
2.	Рентгеновский дифрактометр Bruker D8 Discover	Bruker, Германия	№140/1 -05.12.11	21,7
3.	Лазерный генератор микро-изображений µPG101	Heidelberg Instruments Mikrotechnik, GmbH, Германия	№837 -16.12.11	9,8
4.	Вакуумная Установка СММ-2000. Часть 1 Часть 2	Россия	№01-22/140 29.08.2011 №02-22/140 - 12.04.12	9,5 9,1
5.	Вакуумная установка резистивного и электронно-лучевого испарения с холловским ионным источником Amod 206	Angstrom Engineering, Канада	№68 - 01.08.12	10,0
6.	Генератор сигналов Agilent Technologies E8257D	Agilent Technologies, США	№18 - 28.06.12	2,75
7.	Станция ожижения гелия Cryomech LHeP18 с системой сбора газообразного гелия	Cryomech Inc., США	№957 - 18.09.12	9,1
8.	Атомно-силовой микроскоп Ntegra Prima	ЗАО «НТ-МДТ», Россия	№111 - 13.06.12	4,3
9.	Центрифуга для нанесения	MIDAS	№ 83 14.09.12	0,40

	фоторезиста SPIN-1200D	SYSTEM Co., Ltd (Корея)		
10.	Комплект узлов для установки МВЕ	Россия	№15 15.10.2012	2,5
Всего				79,6

Руководитель работ по контракту
зам. директора по НИР ИФМ РАН, д.ф.-м.н.

Шашкин

В.И. Шашкин

«23» октября 2012 г.



Приложение Е

к отчету о НИР «Развитие центром коллективного пользования научным оборудованием комплексных исследований в области формирования и исследования многослойных наноструктур на основе Si, GaAs и GaN для пассивных и активных элементов нанoeлектроники и нанофотоники миллиметрового и инфракрасного диапазонов длин волн». Этап 4. Обобщение и оценка результатов исследований

Лабораторная технология металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ), обеспечивающая формирование низкобарьерных контактов металл-полупроводник

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФМ РАН, профессор



З.Ф. Красильник

«10» 10 2012 г.

Лабораторная технология металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ), обеспечивающая формирование низкобарьерных контактов металл-полупроводник

Рост эпитаксиальных слоёв GaAs и осаждение металлических плёнок алюминия для формирования барьерного контакта проводится в установке металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ) при пониженном давлении в реакторе.

В качестве источников галлия, мышьяка и легирующей примеси кремния используются $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$, AsH_3 и SiH_4 , соответственно. Газом носителем служит водород. В качестве подложек используются монокристаллические пластины n^+ -GaAs, легированные Te или Si с концентрацией электронов $>10^{18} \text{ см}^{-3}$, разориентированные на 2° от плоскости (100).

Температура роста слоёв GaAs составляет 620°C . Давление в реакторе 100 мбар.

Последовательность наращивания слоёв следующая.

- ✓ Сначала на подложку осаждается сильнолегированный буферный слой n^+ -GaAs толщиной $0,1 \div 0,3 \text{ мкм}$ с концентрацией носителей $(4 \div 6) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.
- ✓ Затем $\sim 0,1 \text{ мкм}$ нелегированного (концентрация $\leq 10^{16} \text{ см}^{-3}$) GaAs. Из-за малого уровня легирования электрическое поле в этом слое является практически однородным, что является характерным для диодов Мотта.
- ✓ Далее проводится формирование дельта - легированного слоя (δ -слой) с поверхностной концентрацией электронов $(5 \div 20) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Его осаждение осуществляется в режиме прерывания роста.
- ✓ После этого выращивается покрывающий слой нелегированного GaAs толщиной $4 \div 5 \text{ нм}$.
- ✓ На последнем этапе температура в реакторе снижается до $170^\circ\text{C} - 190^\circ\text{C}$, и в том же реакторе МОГФЭ без прерывания процесса проводится осаждение плёнки металлического алюминия толщиной $0,2 \div 0,25 \text{ мкм}$, используя в качестве источника алюминия диметилэтиламиноалан.

Руководитель работ по контракту
зам. директора по НИР ИФМ РАН, д.ф.-м.н.

 В.И. Шашкин

«10» октября 2012 г.

Приложение Ж

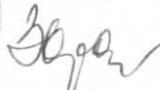
к отчету о НИР «Развитие центром коллективного пользования научным оборудованием комплексных исследований в области формирования и исследования многослойных наноструктур на основе Si, GaAs и GaN для пассивных и активных элементов наноэлектроники и нанофотоники миллиметрового и инфракрасного диапазонов длин волн». Этап 4. Обобщение и оценка результатов исследований

Лабораторная технология формирования планарных диодов на основе низкобарьерных контактов металл-полупроводник

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФМ РАН, профессор



 З.Ф. Красильник
«10» 10 2012 г.

Лабораторная технология формирования планарных диодов на основе низкобарьерных контактов металл-полупроводник

Планарные диоды изготавливаются на базе структур, сформированных с использованием «Лабораторной технологии металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ), обеспечивающая формирование низкобарьерных контактов металл-полупроводник».

Отличительной особенностью технологии является использование несущей плёнки полиимида, обеспечивающего механическую прочность и низкие значения паразитной емкости. Это достигается за счет того, что полупроводниковый материал полностью удаляется из-под вывода барьерного контакта и остается только в активной области диода.

Травление полупроводника осуществляется с лицевой стороны пластины на глубину $6\div 8$ мкм. При этом происходит окончательное формирование площади активной области, определяющей емкость будущего диода. Для дополнительной металлизации на барьерный контакт методом высокотемпературного термического испарения в вакууме осаждаются слои Ti и Au.

Окончательный рисунок формируется с помощью ионно-химического травления под защитой маски фоторезиста. В качестве омического контакта используется эвтектика AuGe-Au, формируемая с помощью вакуумного напыления и метода обратной фотолитографии.

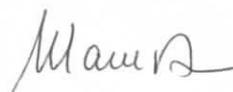
Вплавление контакта осуществляется при температуре около 400°C в атмосфере гелия.

Балочные выводы диода формируются с помощью гальванического осаждения золота толщиной $6\text{-}8$ мкм в окнах полиимида. Для этого на поверхность пластины наносится раствор полиамидокислоты толщиной $6\div 8$ мкм и производится имидизация при температуре $300\div 350^{\circ}\text{C}$ в течение 1 часа. Далее проводится плазмо-химическое травление слоя полиимида под защитой металлической алюминиевой маски.

Для обеспечения механической прочности конструкции диода формируется второй слой полиимида толщиной $6\div 8$ мкм.

В конце технологического цикла изготовления диодов, пластины наклеиваются лицевой стороной на планарный носитель, и производится полное стравливание полупроводника с обратной стороны. Площадь анода сформированного диода составляет от 8 до 12 мкм².

Руководитель работ по контракту
зам. директора по НИР ИФМ РАН, д.ф.-м.н.

 В.И. Шашкин

«10» октября 2012 г.